

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

Vliv znečištění a vlhkosti na izolátorových závěsech u
vedení přenosové soustavy na velikost svodových ztrát

Influence of Pollution and Humidity on Transmission
Network Insulator Strings on Value of Leakage Losses

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Martin Hlavička

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Vliv znečištění a vlhkosti na izolátorových závěsech u vedení přenosové soustavy na velikost svodových ztrát
Influence of Pollution and Humidity on Transmission Network Insulator Strings on Value of Leakage Losses

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technických ztrát elektrické energie u vedení VVN a ZVN PS ČR
2. Teorie znečištění izolátorových závěsů u vedení přenosové soustavy
3. Vytvoření metodiky výpočtu svodových ztrát u vedení přenosové soustavy
4. Uplatnění metodiky výpočtu svodových ztrát (predikčních závislostí)
5. Uplatnění metodiky výpočtu ztrát svodem v energetické praxi
6. Softwarové řešení výpočtu svodových ztrát
7. Zhodnocení výsledků a stanovení závěrů

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Hradílek Z. : Elektroenergetika, skripta VŠB Ostrava 1992
2. Santarius P. : Elektrické stanice a vedení, skripta VŠB Ostrava 1990
3. Rudolf L. : Komplexní rozbor elektrických ztrát vedení PS, habilitační práce VŠB TUO, 2009
4. Dokumentace ČEPS, a.s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

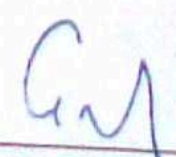
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

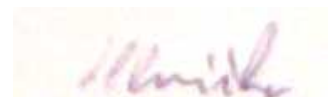

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Šnášel, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 4.5.2012



.....

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce,
prof. Ing. Stanislavu Ruskovi, CSc., a Doc. Ing. Ladislavu Rudolfovi, Ph.D.
za jejich ochotu a čas, který mi při sestavování práce věnovali a také za jejich
cenné rady a doporučení.

Seznam vybraných použitých symbolů a značek:

Značka	Název	Jednotka
R	rezistence	Ω
C	kapacita	F
ČEPS	Česká energetická přenosová soustava	-
ČR	Česká republika	-
E	intenzita elektrického pole	$V \cdot m^{-1}$
EGÚ	laboratoř velmi vysokého napětí	-
G	svodová vodivost	S
I_1	vstupní proud	A
I_2	výstupní proud	A
I	proud vodičem	A
I_{svod}	svodový proud	A
J	proudová hustota	$A \cdot m^{-2}$
L	indukčnost	H
P	přenášený výkon	MW
P_{max}	maximální přenášený výkon	MW
P_{min}	minimální přenášený výkon	MW
$P_{průměr}$	průměrný přenášený výkon	MW
Q	jalový výkon	var
R_x	vzdálenost elementu	mm
S	průřez vodiče	mm^2
U_1	vstupní napětí	V
U_2	výstupní napětí	V
U_f	fázové napětí	V
U_{KR}	kritické napětí koróny	kV
U_s	sdružené napětí	V
VVN	velmi vysoké napětí	-
X_L	induktivní reaktance	Ω
Y	příčná admitance	S
Z	podélná impedance	Ω
Z_v	vlnová impedance	Ω
ZVN	zvlášť vysoké napětí	-

a_s	střední vzdálenost vodičů	cm
c	koeficient respektující vrstvu znečištění, typ, složení a počet izolátorových závěsů	S
f	frekvence sítě	Hz
f_{tv}	tvarový faktor izolátoru	$m \cdot mm^{-2}$
i_n	počet paralelních větví izolátorových závěsů	-
j_n	počet izolátorových závěsů v sérii	-
k_n	počet stožárů n-té skupiny	-
k_z	činitel zatížení	-
l	délka vedení	km
m_1	součinitel hladkosti vodiče	-
m_2	součinitel počasí	-
r	poloměr vodiče	cm
t	čas	h
tzn.	to znamená	-
ΔL_i	element povrchové dráhy	mm
ΔP	Jouleovy ztráty	W
$\Delta P_{celkové}$	celkové činné ztráty	W
ΔP_K	ztráty korónou	W
ΔP_{svod}	svodové ztráty	W
$\Delta P_{záv}$	svodové ztráty na jednom závěsu	W
γ	měrná povrchová vodivost	$S \cdot m \cdot mm^{-2}$
δ	poměrná hustota vzduchu	-
ρ	měrný odpor vrstvy znečištění	-
ω	úhlová frekvence	$rad \cdot s^{-1}$

Obsah

ÚVOD	9
1. Rozbor vedení přenosové soustavy ČR	10
1.1. Přenosová soustava [8]	10
1.2. Teorie vedení VVN a ZVN	12
1.3. Rozvodná Kletné TR 400/110 kV	16
2. Rozbor technických ztrát elektrické energie u vedení VVN a ZVN	18
2.1. Ztráty Jouleovy	18
2.2. Ztráty svodem	19
2.3. Ztráty korónou	20
3. Teorie znečištění izolátorových závěsů u vedení přenosové soustavy	22
3.1. Tvarový faktor izolátoru [12]	22
3.2. Elementární vodivá vrstva znečištění na povrchu izolátoru [7]	24
4. Vytvoření metodiky výpočtu svodových ztrát u vedení přenosové soustavy	26
4.1. Výpočet tvarového faktoru pro izolátor LS75/21	26
4.2. Výpočet svodu na vybraném vedení V403	29
4.3. Výpočet svodu na vybraném vedení V457	33
4.4. Výpočet svodu na vybraném vedení V443	36
4.5. Svodové ztráty v závislosti na čase u vedení V403, V457 a V443	39
5. Modelové stavy izolátorových závěsů u vedení přenosové soustavy	43
5.1. Výpočet svodových ztrát u modelového vedení V1	43
5.2. Výpočet svodových ztrát u modelového vedení V2	44
5.3. Výpočet svodových ztrát u modelového vedení V3	46
5.4. Zhodnocení výpočtu modelového vedení	47
5.5. Svodové ztráty v závislosti na čase u modelových vedení V1, V2, V3	48
6. Koeficient respektující vrstvu znečištění na izolátorech, typ, složení a počet izolátorových závěsů na vedení VVN a ZVN	51
7. Uplatnění metodiky výpočtu svodových ztrát	52
8. Porovnání metodiky výpočtu svodových ztrát na izolátorových závěsech	56
9. Závěr	59
10. Seznam použité literatury	60

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá vlivem znečištění a vlhkosti na izolátorových závěsech u vedení přenosové soustavy na velikost svodových ztrát. V úvodu práce je popsána přenosová soustava, teorie elektrického vedení a rozbor technických ztrát elektrické energie u vedení VVN a ZVN. Je zde popsáno odvození a výpočet tvarového faktoru a znečištění izolátorových závěsů přenosové soustavy. V diplomové práci je vytvořena metodika výpočtu svodových ztrát. Metodika výpočtu se opírá o nové parametry, jako je tvarový faktor, složení izolátorového závěsu, měrné povrchové vodivosti znečištění a další. Uvedená metodika je použita pro výpočet svodových ztrát u nově přeizolovaných vedení přenosové soustavy. Následně jsou provedeny výpočty svodových ztrát u tří modelových vedení pro porovnání výsledků svodových ztrát u používaných izolátorových závěsů. V závěru diplomové práce je provedeno zhodnocení dosažených výsledků a navrhnutí možností pro využití v praxi.

Abstract:

This thesis examines the influence of pollution and humidity on transmission network insulator strings on value of leakage losses. The transmission, theory electrical network and analysis of the technical losses of the electrical energy on the high-voltage line and very high-voltage line are described at the begin of the thesis. Methodology of calculation is be grounded about new parameters such as form factor, composition of insulator string, specific surface conductivity, pollution, etc. Methodology for calculating leakage losses at new re insulated line of transmission system are used for calculate. Calculations of leakage losses at the occasion of three-model line for comparison results leakage losses at used insulation strings are executed. An assessment of results and propose options for practical use are summarize in the end of thesis.

Klíčová slova:

přenosová soustava, svodové ztráty, izolátorový závěs, znečištění, vlhkost, elektrické vedení

Keywords:

transmission network, leakage losses, insulator strings, pollution, humidity, electrical line

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá otázkou vlivu znečištění a vlhkosti na izolátorových závěsech u vedení přenosové soustavy na velikost svodových ztrát. Svodové ztráty v praxi způsobují na vedeních VVN a ZVN nezanedbatelnou část technických ztrát. Svodové ztráty jsou způsobeny především nedokonalou izolací a znečištěním izolátorových závěsů. Znečištění izolátorových závěsů způsobuje tok svodových proudů, a to vede ke zvýšení elektrických ztrát. Znečištění na izolátorových závěsech je způsobeno čistotou ovzduší v lokalitě, kde konkrétní vedení VVN a ZVN prochází.

V diplomové práci je uveden postup výpočtu tvarového faktoru a měrné povrchové vodivosti izolátorového závěsu. Tvarový faktor velmi ovlivňuje velikost svodového proudu a tím i velikost svodových ztrát. Čím je tvarový faktor izolátorového závěsu větší, tím se zmenší svodový proud. Z důvodu snížení toku svodových proudů po povrchu izolátorového závěsu, přicházejí výrobci s novými trendy, mezi které patří délka a tvar povrchové dráhy izolátoru, průměr izolátoru a nové konstrukční materiály.

V úvodní části diplomové práce je proveden rozbor teorie vedení a popsán postup metodiky výpočtu svodových ztrát. Při objasnění vlivu znečištění a vlhkosti se s touto metodikou počítá. U výpočtů jsou využita data společnosti ČEPS, a.s., jedná se o data na jednotlivých přenosových vedeních České republiky. V práci je uvedeno porovnání tří nejpoužívanějších typů izolátorových závěsů pomocí uvedené metodiky. Uvedeny jsou možnosti praktického využití se softwarovým řešením.

Vytýčené cíle diplomové práce:

- Zpracování teoretické části
- Vytvoření metodiky výpočtu tvarového faktoru u používaných izolátorových závěsů na vedeních přenosové soustavy
- Použití metodiky výpočtu svodových ztrát na vedeních přenosové soustavy (dle Doc. Ing. Ladislava Rudolfa, Ph.D.)
- Odvození koeficientů měrné povrchové vodivosti, které představují znečištění na izolátorových závěsech přenosové soustavy
- Provedení výpočtů svodových ztrát tří vybraných vedení přenosové soustavy
- Výpočty svodových ztrát u používaných izolátorových závěsů na modelových vedeních
- Porovnání výsledků svodových ztrát u vybraných izolátorových závěsů a stanovení závěrů
- Uplatnění metodiky výpočtu svodových ztrát a výsledků v praxi

1. Rozbor vedení přenosové soustavy ČR

V kapitole je proveden rozbor přenosové soustavy České republiky. Přenosová soustava je systém zařízení, která zajišťují přenos elektrické energie od výrobců k odběratelům, čímž se míní přenos ve velkých měřítcích, od elektráren k velkým rozvodnám. Přenosová soustava tvoří základ přenosu elektrické energie a zajišťuje přenosy na velké vzdálenosti.

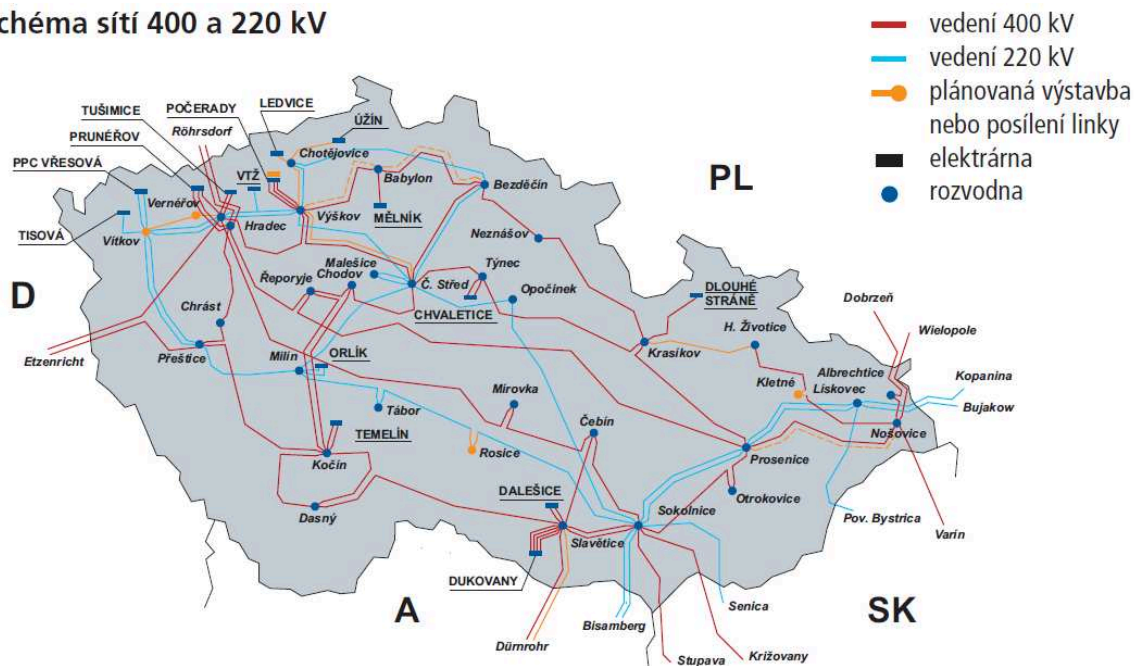
1.1. Přenosová soustava [8]

Přenosová soustava ČEPS, a.s. představuje subsystém elektrizační soustavy České republiky, který propojuje všechny významné subjekty v soustavě a zajišťuje rozhodující podíl zahraniční spolupráce. Přenosovou soustavu ČEPS, a.s. tvoří 38 rozvodných zařízení 420 kV a 245 kV umístěných ve 30 transformovnách, dále 2979 km tras vedení 400 kV a 1371 km tras vedení 220 kV. Do přenosové soustavy patří i jedna rozvodna 123 kV a 56 km tras vedení 110 kV.

ČEPS, a.s. zajišťuje přenos elektřiny, provoz, údržbu a rozvoj přenosové soustavy, dispečerské řízení elektrizační soustavy České republiky v reálném čase. Jako systémovou službu dále zpracovává a testuje plán obrany přenosové soustavy proti šíření poruch a plán obnovy elektrizační soustavy po rozsáhlých systémových poruchách. Technicky řídí systémové služby, jako je regulace výkonu a kmitočtu, regulace napětí a jalového výkonu a řídí potřebné výkonové rezervy.

Schéma přenosové soustavy České republiky:

Schéma sítí 400 a 220 kV



Obr. 1.1 – Schéma přenosové soustavy ČR

Zařízení přenosové soustavy

Struktura zařízení přenosové soustavy je uvedena v následující tabulce. Z celkové délky vedení 110 kV až 400 kV (5 483 km) činí vedení vybavena optikou 2 628 km. Ve 30 transformovných přenosové soustavy je celkový instalovaný výkon transformátorů 18 830 MVA a kompenzačních tlumivek 1 346 MVar.

Tabulka 1.1 Zařízení přenosové soustavy

Popis zařízení	Celkem ČR	Jednotky
Délka vedení 400 kV	3 479	km
Délka vedení 220 kV	1 909	km
Délka vedení 110 kV	84	km
Zahraniční vedení 400 kV	11	ks
Zahraniční vedení 220 kV	6	ks
Rozvodny 420 kV	24	ks
Rozvodny 245 kV	14	ks
Rozvodny 123 kV	1	ks
Transformační výkon	18 830	MVA
Transformátory 400/220 kV	4	ks
Transformátory 400/110 kV	43	ks
Transformátory 220/110 kV	21	ks
Kompenzační výkon 400 kV	660	MVar
Kompenzační výkon 35 kV	277,2	MVar
Kompenzační výkon 10 kV	408,6	MVar
Kompenzační uzly (tlumivky) 400 kV	4	ks
Kompenzační uzly (tlumivky) 35 kV	5	ks
Kompenzační uzly (tlumivky) 10 kV	9	ks

Tabulka 1.2 Typy vedení provozovaných ČEPS, a.s.

Popis zařízení	Délka vedení (km)
Vedení 400 kV	3 479
z toho dvojitě a vícenásobné vedení	1 117
Vedení 220 kV	1 909
z toho dvojitě a vícenásobné vedení	1 016
Vedení 110 kV	84
z toho dvojitě a vícenásobné vedení	77



Obr. 1.2 – Vedení přenosové soustavy

1.2. Teorie vedení VVN a ZVN

Elektrické ztráty na vedeních přenosové soustavy mají pro řízení a provoz elektrizační soustavy velký význam. Ztráty elektrické energie z podstaty věci vznikají ve všech prvcích přenosové soustavy a nelze je zcela odstranit, dají je však cíleně zmenšovat. Jejich snížení se pozitivně projeví v chodu soustavy i ekonomice provozu. Aby bylo docíleno co nejnižších ztrát, je nutno pochopit příčiny jejich vzniku. Pro pochopení ztrát vedení a jejich vzniku se pokusím teoreticky přiblížit funkci přenosové soustavy, které je možné popsat elektrickými parametry a náhradními schématy. [10]

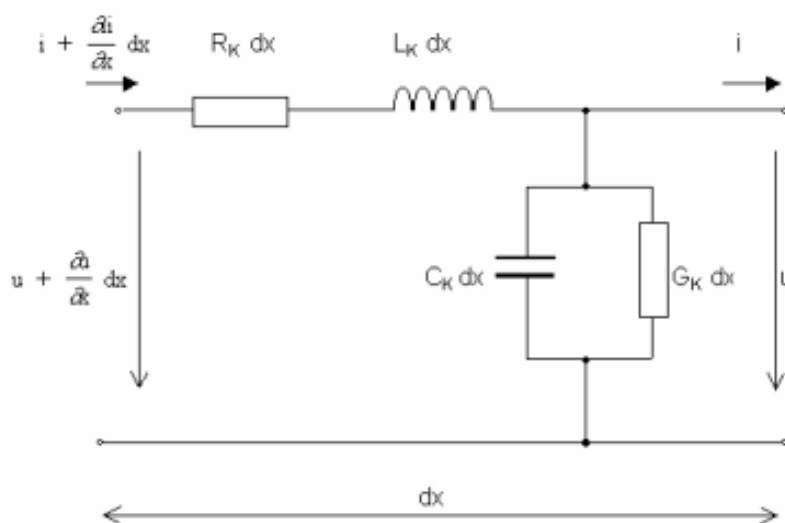
1.2.1. Elektrické parametry vedení [10]

Pro pochopení vzniku ztrát si nejdříve definuji fyzikální veličiny, které tvoří parametry vedení a jeho popis náhradním odvodem. Náhradní obvod tvoří zapojení různého počtu prvků R , L , C , G . Pro fyzikální představu se zobrazuje jednopólový model s uvedenými parametry. Vedení si představíme jako souhrn nekonečného počtu těchto elementů o délce dx vztažených na jednotku délky.

Obecně mají vodiče tyto základní parametry:

- činná rezistence R (Ω)
- provozní indukčnost L (H)
- provozní kapacita C (F)
- svod (svodová vodivost) G (S)

Těmito základními hodnotami vztaženými na jednotku délky lze popsat každé vedení, které přenáší elektrickou energii.



Obr. 1.3 – Jedno pólový model vedení přenosové soustavy

Při výpočtech střídavých vedení VVN a ZVN jsou uvažovány všechny čtyři parametry vedení.

Základními parametry vedení jsou činná rezistence R a induktivní reaktance X_L , tvoří tzv. podélnou impedanci vedení

$$\bar{Z} = \bar{R} + j\bar{X}_L \quad (\Omega) \quad (1.1)$$

Z ... impedance $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$

R ... činná rezistence $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$

X_L ... induktivní reaktance $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$

Reálnou část podélné impedance tvoří činná rezistence a imaginární část tvoří induktivní reaktance X_L .

$$X_L = \omega L \quad (\Omega) \quad (1.2)$$

L ... indukčnost $(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$

ω ... úhlová frekvence $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$

Provozní kapacita vedení C a svodová vodivost G tvoří tzv. příčnou admitanci vedení

$$\bar{Y} = \bar{G} + j\omega\bar{C} \quad (\text{S}) \quad (1.3)$$

Y ... admittance $(\text{S} \cdot \text{km}^{-1})$

G ... svodová vodivost $(\text{S} \cdot \text{km}^{-1})$

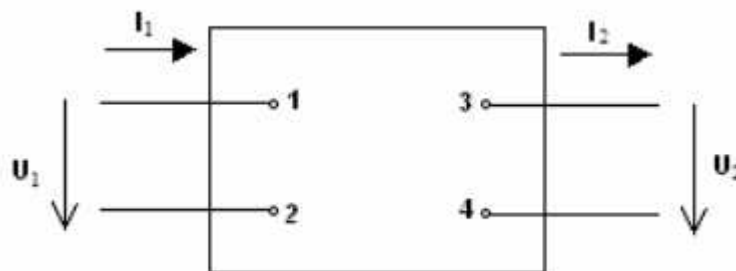
C ... provozní kapacita

$\omega = 2\pi f$... úhlová frekvence $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$

f ... frekvence sítě (Hz)

1.2.2. Náhradní schéma vedení [1]

Při řešení obecných sítí vedení VVN a ZVN můžeme vedení nahradit modelem neboli náhradním obvodem. Tento obvod je na základě čtyřpólu tvořen dvěma vstupními a dvěma výstupními svorkami. Jedná se o tzv. dvojbran. Dvojbrany nejčastěji pracují jako mezičlánek u přenosové cesty mezi zdroji a spotřebiči. Při řešení je důležitý předpoklad, aby byl čtyřpól souměrný.



Obr. 1.4 – Schéma dvojbranu

Pro obecný souměrný čtyřpól platí:

$$\bar{U}_1 = \bar{A} \cdot \bar{U}_2 + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 \text{ (V)} \quad (1.4)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{U}_2 + \bar{D} \cdot \bar{I}_2 \text{ (A)} \quad (1.5)$$

- U_1 ... vstupní napětí (V)
- I_1 ... vstupní proud (A)
- U_2 ... výstupní napětí (V)
- I_2 ... výstupní proud (A)
- A, B, C, D ... Blondelovy konstanty

Jestliže známe Blondelovy konstanty, můžeme pak vyčíslit hodnoty vstupního proudu a napětí.

1.2.3. Blondelovy konstanty [10]

Při řešení vedení VVN a ZVN vycházíme ze zadaných poměrů jednoho konce vedení pro stanovení poměrů druhého konce. Při znalosti poměrů můžeme určit účinnost přenosu a činné ztráty vedení. Vedení 400 kV a vedení 220 kV nahradíme modelem s rozloženými parametry, tzn., že při výpočtech bereme v úvahu všechny náhradní parametry vedení. Pro vyčíslení poměrů vedení použijeme Blondelovy konstanty (A, B, C, D).

$$\bar{A} = \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (-) \quad (1.6)$$

$$\bar{B} = Z_v \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (\Omega) \quad (1.7)$$

$$\bar{C} = \frac{\sinh(\bar{\gamma} \cdot l)}{\bar{Z}_v} \quad (S) \quad (1.8)$$

$$\bar{D} = \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad (-) \quad (1.9)$$

γ ... činitel šíření (km^{-1})

l ... délka vedení (km)

Z_v ... vlnová impedance (Ω)

Činitel šíření se vypočte jako druhá odmocnina ze součinu impedance a admitance

$$\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}} \quad (\text{km}^{-1}) \quad (1.10)$$

Vlnovou impedanci vypočteme jako druhá odmocnina z podílu podélné impedance a příčné admitance

$$\bar{Z}_v = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} \quad (\Omega) \quad (1.11)$$

1.3. Rozvodná Kletné TR 400/110 kV

Diplomová práce se zabývá přenosovou soustavou České republiky, a proto je zde uvedena tato nově vybudovaná rozvodna, neboť jde o velmi významné posílení dodávek toků výkonů v přenosové soustavě v rámci Moravskoslezského kraje. Uvedená rozvodna aktualizuje nové parametry přenosové soustavy. Jedná se o vznik dvou nových vedení V459 a V405 a to rozdělením původního vedení V495, u těchto nově vzniklých vedení se mohou také počítat svodové ztráty.

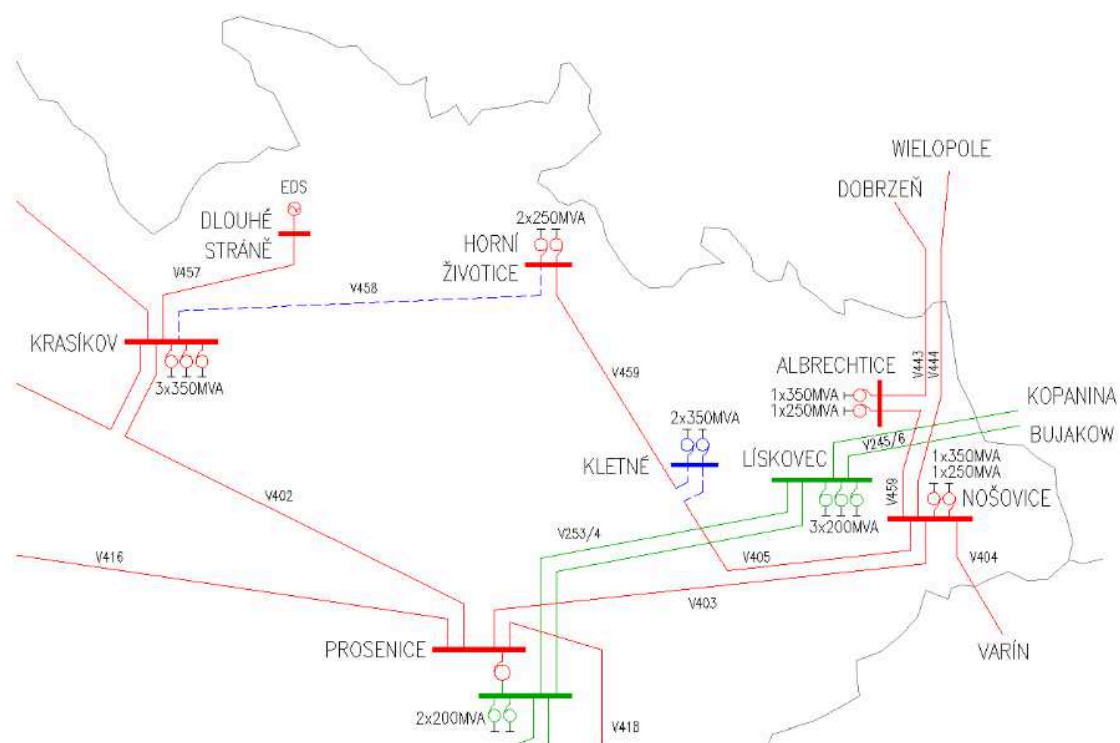
Nová transformovna o instalovaném transformačním výkonu 2x 350 MVA, nedaleko Nového Jičína mezi obcemi Suchdol nad Odrou a Hladkými Životicemi, vyrostla na ploše 27,5 ha. Vznikla Rozdělením původního vedení 400kV přenosové soustavy ČEPS,a.s. V459 mezi rozvodnou Horní Životice a rozvodnou Nošovice. Realizace této výstavby začala v květnu 2010 a do provozu byla uvedena 1. ledna roku 2012. Náklady dosahují 2 mld. Kč. Díky této výstavbě dojde k výraznému výkonovému posílení Ostravska a umožní také připojení nových odběrů a výroben. Tato transformovna 400/110 kV je důležitou uzlovou stanicí přenosové a distribuční soustavy České republiky určenou k zásobování elektrickou energií přilehlých oblastí Moravskoslezského a Olomouckého kraje z distribuční soustavy 110 kV ČEZ Distribuce, a.s.

Parametry rozvodny:

Nejvyšší napětí	420kV
Jmenovitý kmitočet	50Hz
Jmenovitý proud přípojnic/ polí	4000A/ 2500A
Jmenovitý krátkodobý proud	50kA (1s)
Jmenovitý dynamický proud přípojnic	125kA
Prostředí venkovní	AB8 (rozsah teplot -35°C až +40°C)
Námrazová oblast	L (lehká AU1)
Oblast znečištění	II. (AF2)



Obr. 1.5 – Současný stav TR 400/110 kV Kletné



Obr. 1.6 - Výstavba nové TR 400/110 kV Kletné



Obr. 1.7 - Výstavba nové TR 400/110 kV Kletné

2. Rozbor technických ztrát elektrické energie u vedení VVN a ZVN

Ztráty na venkovním vedení můžeme rozdělit:

- podélné - Jouleovy (měnící se s kvadrantem zatížení)
- příčné (závislé na napětí)
 - svodem (přes izolátory, závislé na znečištění a klimatických podmínkách)
 - korónou (závislé na konstrukci vodičů, jejich uložení, znečištění a klimatických podmínkách)

2.1. Ztráty Jouleovy

Jouleovy ztráty tvoří převážnou část ztrát na vedení. Ve vodiči vzniká průchodem proudu teplo a toto teplo je úměrné druhé mocnině proudu, který jím prochází. Velikost těchto ztrát závisí na velikosti proudu procházejícího vodičem.

Pro vyjádření ztrát vedení rezistencí vycházíme z Ohmova zákona:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (\Omega) \quad (2.1)$$

R	... rezistence vodiče (Ω)
ρ	... měrný odpor vodiče ($\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{km}^{-1}$)
l	... délka vodiče (km)
S	... průřez vodiče (mm^2)

Pro ztráty vedení platí vztah:

$$\Delta P = k_z \cdot R \cdot I^2 \quad (\text{W}) \quad (2.2)$$

ΔP	... Jouleovy ztráty (W)
k_z	... činitel zatížení (-)
R	... rezistence vedení (Ω)
I	... proud vodičem (A)

Činitel zatížení k_z je závislý na rozložení odběru podél vedení a bývá 1÷3. U vedení VVN a ZVN je činitel zatížení zpravidla roven 3, neboť celou délkou jeho vedení protéká stejný proud až k místu odběru.

2.2. Ztráty svodem

Svodová vodivost tvoří jeden z parametrů příčné admitance vedení, který se u napěťových hladin 400 kV a 220 kV nezanedbává, protože jeho velikost dosahuje už velkých hodnot. V technické praxi neexistuje absolutní elektrický izolant, a proto při provozu vedení prochází za určitých podmínek (např. znečištění izolátorů, vlhko, déšť) svodový proud. Tento proud teče z vodiče přes izolátory a sloupy do země. Svod tedy závisí na kvalitě izolátorů, ale také na atmosférických a provozních podmínkách. Svod způsobuje na vedení činné ztráty a obvykle se vyjadřuje v hodnotách svodových ztrát na kilometr vedení.

Svodové ztráty lze vyčíslit [5]

$$\Delta P_S = 3 \cdot U_f^2 \cdot G_S = U_S^2 \cdot G_S \quad (\text{W} \cdot \text{km}^{-1}; \text{V}; \text{S} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.3)$$

ΔP_S ... svodové ztráty ($\text{W} \cdot \text{km}^{-1}$)

U_f ... fázové napětí (V)

U_S ... sdružené napětí (V)

G_S ... svodová vodivost ($\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$)

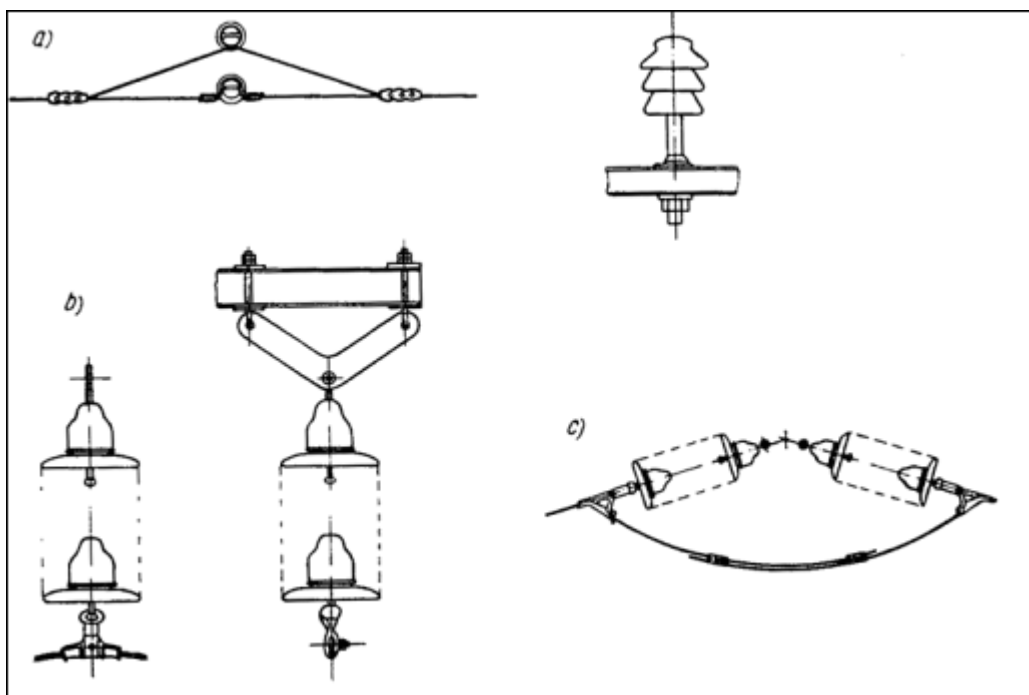
Uvedený postup výpočtu je dle literatury zjednodušený a v rámci zadání diplomové práce je metodika výpočtu ztrát svodem více a podrobněji rozpracována.

Rozlišujeme čtyři stupně znečištění izolátorových závěsů:

Tabulka 2.1 Stupně znečištění izolátorových závěsů

Stupeň znečištění	Výdržná jednotková vodivost vrstvy (μS)	Minimální délka měrné povrchové dráhy ($\text{mm} \cdot \text{kV}^{-1}$)
I	15	16
II	24	20
III	36	25
IV	50	31

Odstranění nečistot z izolátorů se provádí buď čištěním pod tlakem vody (30 min; tzv. umělý déšť), nebo mechanickým čištěním.



Obr. 2.1 - Izolátory (a-roubík, b-nosný izolátorový závěs, c-kotevní závěs)

2.3. Ztráty korónou

Intenzita elektrického pole v okolí vodičů vn a vvn může za jistých předpokladů překročit elektrickou pevnost vzduchu, přičemž určitá část elektrického náboje vystoupí z vodiče do okolí. Tento jev (koróna) způsobuje zvýšení ztrát elektrické energie a dále vysokofrekvenční rušení.

Koróna je doutnavý výboj bledě fialové až narůžovělé barvy, který se objeví, překročí-li intenzita elektrického pole pevnost vzduchu (cca $30 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$). Koróna způsobuje značné ztráty na vedení:

- 0,5 kW/km pro vedení 110 kV
- 1,3-2,5 kW/km pro vedení 400 kV dvojsvazek

Vzhledem ke ztrátám korónou je nutné volit vodič s dostatečným průřezem (vyplývá ze vzorce pro U_{KR}). V praxi se velký průměr vodiče nahrazuje dutými lany nebo svazkovými vodiči. Svazkové vodiče se dielektricky jeví jako jednoduchý vodič o daleko větším ekvivalentním poloměru r_e .

Fázové napětí, při kterém se koróna začne objevovat, se nazývá kritické napětí koróny:

$$U_{KR} = 48,6 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \delta \cdot r \cdot \log \frac{a_s}{r} \quad (\text{kV, cm}) \quad (2.4)$$

m_1 ... součinitel hladkosti vodiče (0,84÷0,95) (-)

m_2 ... součinitel počasí (1 – krásné počasí, 0,8 – špatné počasí) (-)

r ... poloměr vodiče (cm)

a_s ... střední vzdálenost vodičů (cm)

δ ... poměrná hustota vzduchu závislá na nadmořské výšce, tlaku a teplotě vzduchu

Při dešti a jinovatce se může hodnota kritického napětí snížit až o 30 %. Vedení je tedy nutno navrhnut tak, aby kritické napětí za sucha bylo alespoň o 12 % až 15 % větší než třífázové napětí.

Ztráty korónou na 1 km délky jednoho vodiče při jasném počasí jsou:

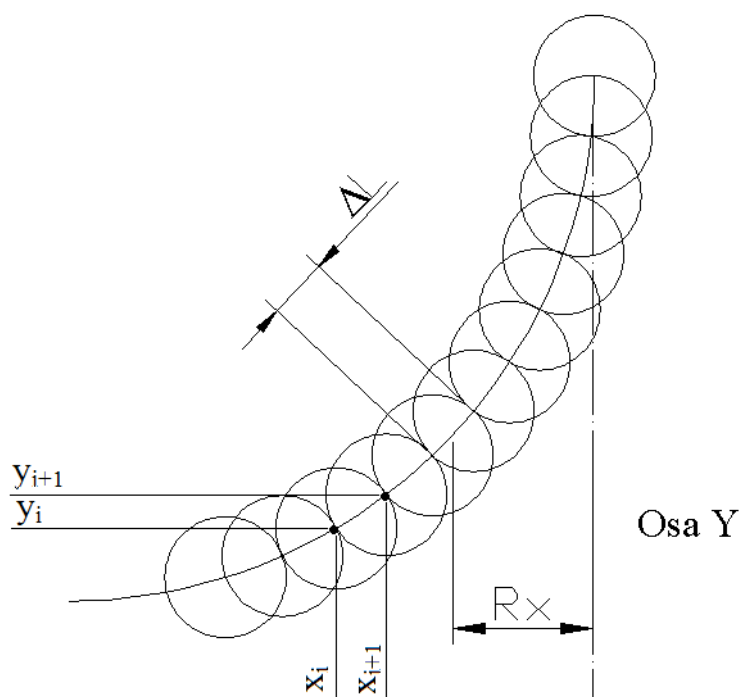
$$\Delta P_K = \frac{0,183}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{r}{a_s}} \cdot (U_f - U_{KR})^2 \quad (\text{kW} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.5)$$

3. Teorie znečištění izolátorových závěsů u vedení přenosové soustavy

Svodové proudy způsobují na vedeních VVN a ZVN nezanedbatelnou část technických ztrát. Tyto ztráty jsou způsobeny převážně špatnou nebo nedokonalou izolací a to především nečistotami na izolátorových závěsech. Nečistoty usazené na izolátorech způsobují tok svodových proudů, a tím zvýšení elektrických ztrát. Znečištění ovlivňuje přímo velikost svodového proudu. Vrstvy nečistot na izolátorech jsou způsobeny čistotou ovzduší a průmyslovou činností v lokalitě, kde se vedení VVN a ZVN nachází. Aby se zmenšily svodové proudy na povrchu izolátoru, přicházejí výrobci s novými trendy, mezi které patří délka a tvar povrchové dráhy, průměr a nové konstrukční materiály izolátorů.

3.1. Tvarový faktor izolátoru [12]

Tvarový faktor prezentuje čísel, který zahrnuje délku a tvar povrchové dráhy izolátoru bez vlivu vrstvy znečištění. Pomocí tvarového faktoru pak můžeme určit vodivost izolátoru. Čím je tvarový faktor větší, tím je potom svodový proud po povrchu izolátoru menší. Při výpočtu činitele tvaru musíme znát základní rozměry izolátoru. Izolátor rozdělíme do několika dílů a překreslíme v měřítku 1:1 pomocí programu AutoCAD. Na povrchu izolátoru nakreslíme malé kružnice o poloměru 1mm, tak aby celá povrchová dráha byla pokryta malými kružnicemi. Z programu AutoCAD dostaneme souřadnice $[x, y]$, které následně převedeme do tabulky v programu Microsoft Excel. V programu Microsoft Excel provedeme pomocí předem nadefinovaných vzorců výpočet.



Obr. 3.1 – Proložení povrchové dráhy izolátoru malými kružnicemi

Vzdálenost Rx každého elementu ΔL_i se vypočítá v jeho středu podle vztahu:

$$Rx = x_{i+1} - \frac{(x_{i+1} - x_i)}{2} \quad (\text{mm}) \quad (3.1)$$

Rx ... je vzdálenost od středu izolátoru (mm)

Element povrchové dráhy ΔL_i konstantní délky:

$$\Delta L_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (\text{mm}) \quad (3.2)$$

Výsledný činitel tvaru povrchové dráhy izolátoru:

$$f_{tv} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_i}{Rx_i}}{2\pi} \quad (\text{m.mm}^{-2}) \quad (3.3)$$

Dále jestliže známe tvarový faktor izolátoru, můžeme pomocí svodového proudu a fázového napětí vypočítat měrnou povrchovou vodivost izolátoru.

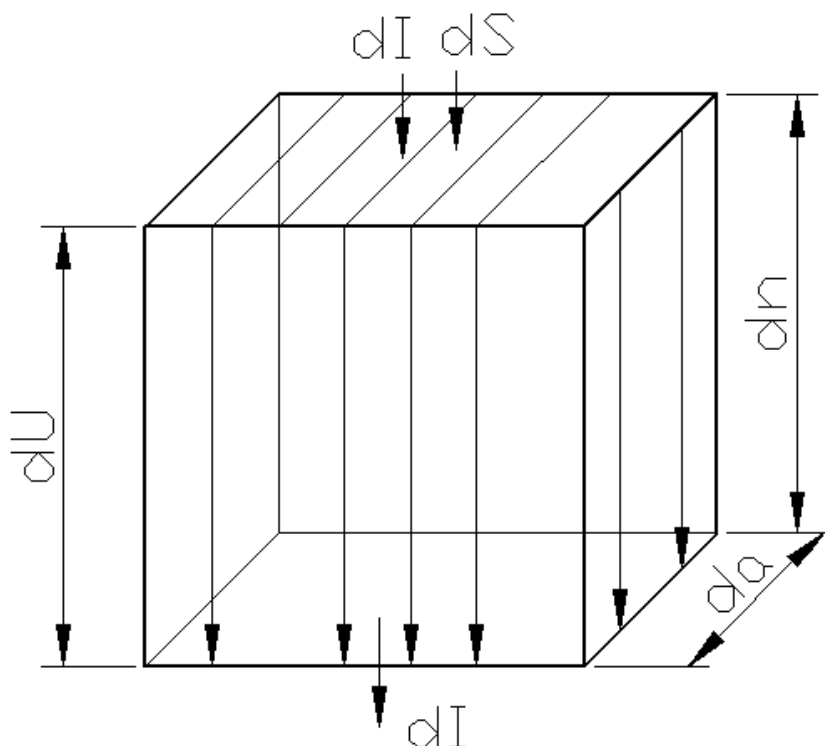
$$\gamma = f_{tv} \cdot \frac{I_{svod}}{U_f} \quad (\text{S.m.mm}^{-2}) \quad (3.4)$$

f_{tv} ... tvarový faktor (m.mm^{-2})

I_{svod} ... svodový proud (A)

U_f ... fázové napětí (kV)

3.2. Elementární vodivá vrstva znečištění na povrchu izolátoru [7]



Obr. 3.2 – Elementární hranolek představující částku znečištění na izolátoru

dU	(V)	... elektrické napětí mezi čelními ploškami hranolku znečištění
dS	(mm ²)	... normálová ploška kolmá ke směru protékajícího svodového proudu
dn	(m)	... elementární výška hranolku vrstvy znečištění
da	(mm)	... elementární šířka hranolku vrstvy znečištění
dI	(A)	... elementární svodový proud

Podmínky výpočtu:

Předpokládejme, že elementární ploška hranolku znečištění (dS) a jeho výška (dn) je dostatečně malá, potom budou obě čelní plošky hranolku znečištění stejné a proudová hustota v hranolku znečištění se může pokládat za konstantní.

Potom můžeme odpor (vodivost) hranolku znečištění vypočítat jako odpor (vodivost) s elementárními rozměry. Odvození je uvedeno níže pomocí známých vzorců.

$$dU = R \cdot dI = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{dn}{dS} \cdot dI \quad (3.5)$$

$$\frac{dU}{dn} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{dI}{dS} \quad (3.6)$$

$$E = \frac{1}{\gamma} \cdot J \quad (3.7)$$

E	(V.m ⁻¹)	... intenzita elektrického pole
J	(A.m ⁻²)	... proudová hustota
γ	(S.m.mm ⁻²)	... měrná vodivost vrstvy znečištění

V izotropickém prostředí je směr intenzity elektrického pole a proudové hustoty stejný, takže vektorově platí:

$$\bar{E} = \frac{1}{\gamma} \cdot \bar{J} = \rho \cdot \bar{J} \quad (3.8)$$

ρ	(Ω.mm ² .m ⁻¹)	... měrný odpor vrstvy znečištění
γ	(S.m.mm ⁻²)	... měrná vodivost vrstvy znečištění

Vztah vyjadřuje Ohmův zákon v elementární formě nebo analogicky můžeme napsat Ohmův zákon v praktickém tvaru:

$$U = R \cdot I \quad (3.9)$$

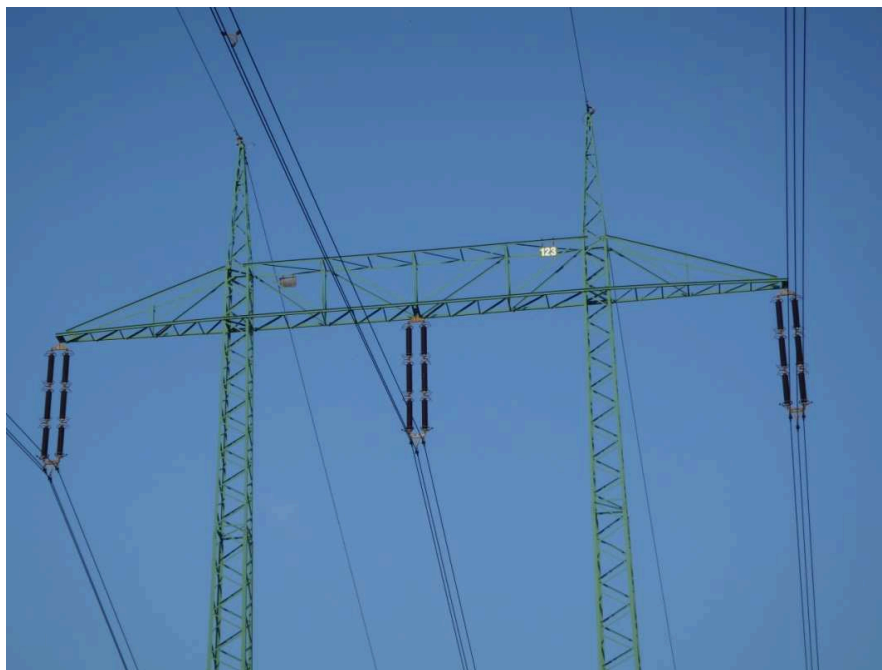
U	(V)	... elektrické napětí
R	(Ω)	... elektrický odpor
I	(A)	... elektrický proud

4. Vytvoření metodiky výpočtu svodových ztrát u vedení přenosové soustavy

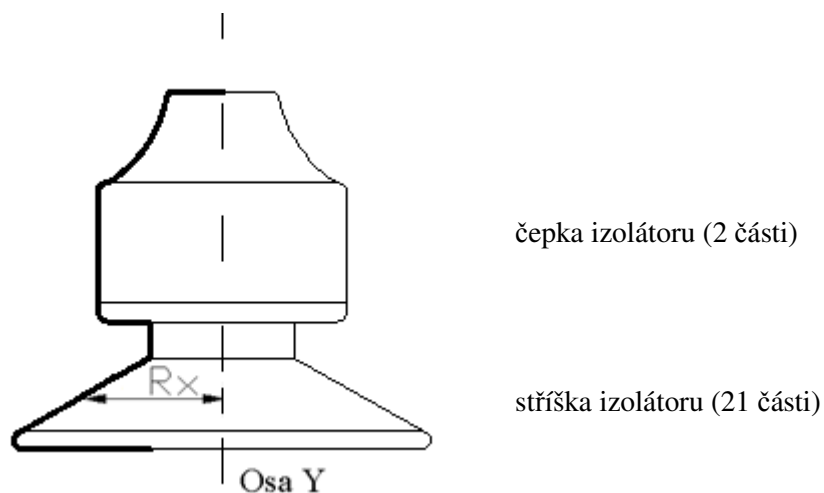
Pro zjištění svodových ztrát u vedení přenosové soustavy se musí nejprve vypočítat tvarový faktor všech izolátorů, které se na daném vedení nacházejí. Následně z tvarových faktorů a změřených svodových proudů na izolátorových závěsech se musí vypočíst měrné povrchové vodivosti všech izolátorů daného vedení. V diplomové práci jsou použity svodové proudy na izolátorových závěsech naměřené v laboratoři VVN v Praze Běchovicích. Pro výpočet svodových ztrát vybraného vedení je třeba znát parametry vedení jako je délka, počet stožárů, složení izolátorových závěsů a typ izolátorů.

4.1. Výpočet tvarového faktoru pro izolátor LS75/21

Pro výpočet tvarového faktoru izolátoru LS75/21 musíme znát základní rozměry dané výrobcem. Pomocí programu AutoCAD si nakreslíme v měřítku 1:1, podle technické dokumentace obrys skutečného izolátoru. V tomto programu nakreslíme na povrchu izolátoru malé kružnice se stejným poloměrem tak, že následující kružnice bude mít střed v průniku předcházející kružnice. Celá povrchová dráha izolátoru je pokryta malými kružničkami. V našem případě o poloměru 1 mm. Poté můžeme pomocí programu AutoCAD odečíst hodnoty souřadnic $[x, y]$ v průsečících každé kružnice na povrchu izolátoru a bude dostatečně vystihnuta i ta nejmenší část zakřivení povrchové dráhy. Následně převedeme získané souřadnice do tabulky v programu Microsoft Excel, kde provedeme podle nadefinovaných vzorců výpočet.

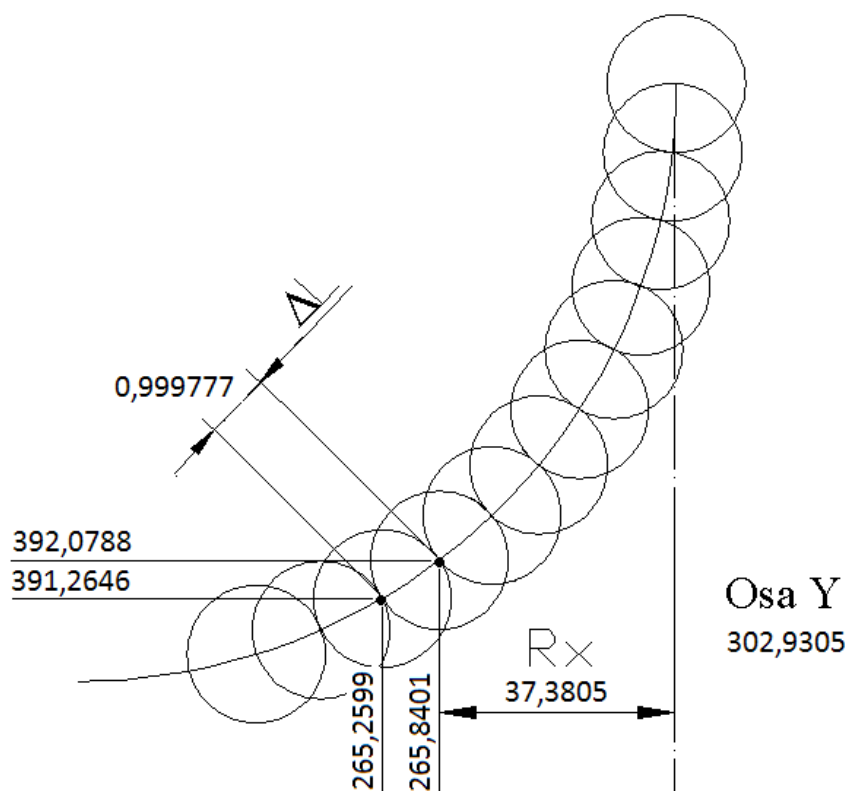


Obr. 4.1 – Ukázka izolátorů $2 \times 3 \times \text{LS75/21}$ na vedení V403



Obr. 4.2 – Výřez izolátoru typu LS75/21 se zvýrazněnou povrchovou dráhou

Ukázka výpočtu činitele tvaru jedné čepky izolátoru:



Obr. 4.3 – Ukázka povrchové dráhy izolátoru s hodnotami

Tabulka 4.1 Ukázka výpočtu tvarového faktoru čepky pomocí souřadnic

Osa	Souřadnice		ΔL	302,9305 - X	Rx
Y	X	Y	(mm)	(mm)	(mm)
302,9305	265,8401	392,0788		37,0904	
302,9305	265,2599	391,2646	0,999777	37,6706	37,3805
302,9305	264,6672	390,4595	0,99974	38,2633	37,96695
302,9305	264,0623	389,6635	0,99976	38,8682	38,56575

Vzdálenost R_x každého elementu ΔL_i se vypočítá v jeho středu podle vztahu:

$$R_x = x_{i+1} - \frac{(x_{i+1} - x_i)}{2} = 37,0904 - \frac{(37,0904 - 37,6706)}{2} = 37,3805 \text{ (mm)} \quad (4.1)$$

R_x ... je vzdálenost od středu izolátoru, tudíž se do vzorce dosazují hodnoty souřadnic odečtené od středu izolátoru (osa Y)

Element povrchové dráhy ΔL_i konstantní délky:

$$\Delta L_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} = \sqrt{(265,8401 - 265,2599)^2 + (392,0788 - 391,2646)^2}$$

$$\Delta L_i = 0,999777 \text{ (mm)} \quad (4.2)$$

Výsledný činitel tvaru povrchové dráhy čepky izolátoru LS75/21:

$$f_{iv} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_i}{R_{x_i}}}{2\pi} = \frac{192,81}{21,53} = 1,425 \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2}) \quad (4.3)$$

Ukázka výpočtu činitele tvaru jedné stříšky izolátoru:

Tabulka 4.2 Ukázka výpočtu tvarového faktoru stříšky pomocí souřadnic

Osa	Souřadnice		ΔL	302,9305 - X	R_x
Y	X	Y	(mm)	(mm)	(mm)
302,9305	254,9157	280,8371		48,0148	
302,9305	254,0475	280,341	0,9999432	48,883	48,4489
302,9305	253,1792	279,8448	1,0000797	49,7513	49,31715
302,9305	252,311	279,3487	0,9999432	50,6195	50,1854

Vzdálenost R_x každého elementu ΔL_i :

$$R_x = x_{i+1} - \frac{(x_{i+1} - x_i)}{2} = 48,0148 - \frac{(48,0148 - 48,883)}{2} = 48,4489 \text{ (mm)} \quad (4.4)$$

Element povrchové dráhy ΔL_i konstantní délky:

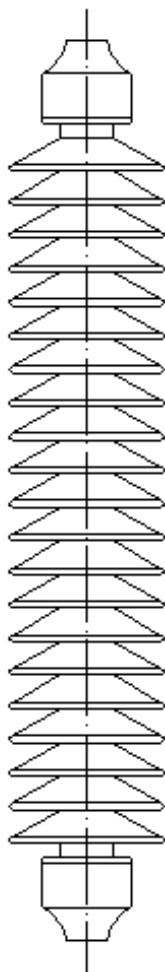
$$\Delta L_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} = \sqrt{(254,9157 - 254,0475)^2 + (280,8371 - 280,341)^2}$$

$$\Delta L_i = 0,9999432 \text{ (mm)} \quad (4.5)$$

Výsledný činitel tvaru povrchové dráhy stříšky izolátoru LS75/21:

$$f_{iv} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_i}{R_{x_i}}}{2\pi} = \frac{148}{63,169} = 0,373 \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2}) \quad (4.6)$$

Výpočet celkového činitele tvaru izolátoru LS75/21:



Tabulka 4.3 Výsledný tvarový faktor izolátoru LS75/21

$n \times \text{objekt}$	$f_{tv} \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2})$	$n \times f_{tv} \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2})$
2 \times čepka	1,425	2,85
21 \times stříška	0,373	7,83
celkem Σ	1,8	10,68

Údaje o izolátoru:

hmotnost:	39 kg
nosnost:	103 kN
délka:	1240 mm
šířka:	200 mm

Obr. 4.4 – Náčrt izolátoru LS75/21

4.2. Výpočet svodu na vybraném vedení V403

Jedná se o vedení, kde došlo k nové přeizolaci a došlo k nové konfiguraci izolátorových závěsů na tomto vedení.

Údaje o vedení V403:

Trasa:	Nošovice, Prosenice
Sdružené napětí:	420 kV
Délka vedení:	79,521 km
Počet stožárů:	241
Typ stožárů:	Portál
Fázové vodiče:	3 x 3 x 350 AlFe4

Tabulka 4.4 Použité izolátorové závěsy u vedení V403

Typ izolátorového závěsu	počet stožárů k_n (-)	složení izolátorového závěsu i_n/j_n (-)
LS 75/21	209	2//3
LS 85/14	24	3//5
LS 85/14	6	3//6
LS 85/14	2	2//5

sdružené napětí

$$U_s = 420 \text{ kV}$$

fázové napětí U_f

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{420}{\sqrt{3}} = 242,48 \text{ kV} \quad (4.7)$$

Ukázka výpočtu měrné povrchové vodivosti pro slabý déšť s vodivostí $498 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$:

$$\gamma_{LS75/21} = f_{iv/LS75/21} \cdot \frac{I_{svod}}{U_f} = 10,68 \cdot \frac{1,914 \cdot 10^{-3}}{242,48 \cdot 10^3} = 8,43 \cdot 10^{-8} \text{ S}\cdot\text{m}\cdot\text{mm}^{-2} \quad (4.8)$$

Hodnoty svodových proudů na izolátorových závěsech byly naměřeny v laboratoři VVN v Praze Běchovicích

Tabulka 4.5 Hodnoty vypočtených γ pro izolátor LS75/21

Stav izolátoru	Za sucha	Slabý déšť	Silný déšť	Slabý déšť	Silný déšť
Vodivost ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		97	97	498	498
Svodový proud (mA)	0,004	0,278	0,812	1,914	2,568
Tvarový faktor f_{iv} ($\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$)	10,68	10,68	10,68	10,68	10,68
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S}\cdot\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$)	$1,76 \cdot 10^{-10}$	$1,22 \cdot 10^{-8}$	$3,578 \cdot 10^{-8}$	$8,43 \cdot 10^{-8}$	$11,311 \cdot 10^{-8}$

Tabulka 4.6 Hodnoty vypočtených γ pro izolátor LS85/14

Stav izolátoru	Za sucha	Slabý déšť	Silný déšť	Slabý déšť	Silný déšť
Vodivost ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		97	97	498	498
Svodový proud (mA)	0,004	0,278	0,812	1,914	2,568
Tvarový faktor f_{iv} ($\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$)	9,47	9,47	9,47	9,47	9,47
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S}\cdot\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$)	$1,56 \cdot 10^{-10}$	$1,086 \cdot 10^{-8}$	$3,171 \cdot 10^{-8}$	$7,475 \cdot 10^{-8}$	$10,029 \cdot 10^{-8}$

Výpočty svodových proudů a ztrát svodem u vedení V403:

Za sucha:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(209 \cdot 2 \cdot \frac{1,76 \cdot 10^{-10}}{3 \cdot 10,686} + 24 \cdot 3 \cdot \frac{1,56 \cdot 10^{-10}}{5 \cdot 9,47} + 6 \cdot 3 \cdot \frac{1,56 \cdot 10^{-10}}{6 \cdot 9,47} + 2 \cdot 2 \cdot \frac{1,56 \cdot 10^{-10}}{5 \cdot 9,47} \right) =$$

$$= 1,88 mA$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 2,595 \cdot 10^{-9}}{79,521} = 5,76 W \cdot km^{-1}$$

(4.9)

- l_n počet skupin stožárů se stejným izolátorovým závěsem na obecném vedení (-)
- k_n počet stožárů n-té skupiny se stejným izolátorovým závěsem na obecném vedení (-)
- i_n počet paralelních větví v izolátorovém závěsu jedné fáze obecného vedení v n-té skupině stožárů (-)
- j_n počet izolátorů v jedné fázi v sérii jednoho izolátorového závěsu v n-té skupině stožárů obecného vedení (-)
- f_{tvn} tvarový faktor jednoho izolátoru v n-té skupině stožárů obecného vedení (m.mm⁻²)
- γ_n měrná povrchová vodivost typu izolátoru z n-té skupiny stožárů obecného vedení (S.m.mm⁻²)

Pro slabý déšť s vodivostí 97 μS.cm⁻¹:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(209 \cdot 2 \cdot \frac{1,22 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 10,686} + 24 \cdot 3 \cdot \frac{1,086 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 9,47} + 6 \cdot 3 \cdot \frac{1,086 \cdot 10^{-8}}{6 \cdot 9,47} + 2 \cdot 2 \cdot \frac{1,086 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 9,47} \right) =$$

$$= 130,9 mA$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,799 \cdot 10^{-7}}{79,521} = 399,2 W \cdot km^{-1}$$

(4.10)

Pro silný déšť s vodivostí $97 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{ivn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{209 \cdot 2 \cdot \frac{3,578 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 10,686} + 24 \cdot 3 \cdot \frac{3,171 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 9,47}}{+ 6 \cdot 3 \cdot \frac{3,171 \cdot 10^{-8}}{6 \cdot 9,47} + 2 \cdot 2 \cdot \frac{3,171 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 9,47}} \right) =$$

$$= 383,7 \text{ mA}$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{ivn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 5,275 \cdot 10^{-7}}{79,521} = 1,17 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}$$

(4.11)

Pro slabý déšť s vodivostí $498 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{ivn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{209 \cdot 2 \cdot \frac{8,345 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 10,686} + 24 \cdot 3 \cdot \frac{7,475 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 9,47}}{+ 6 \cdot 3 \cdot \frac{7,475 \cdot 10^{-8}}{6 \cdot 9,47} + 2 \cdot 2 \cdot \frac{7,475 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 9,47}} \right) =$$

$$= 904,6 \text{ mA}$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{ivn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,243 \cdot 10^{-6}}{79,521} = 2,758 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}$$

(4.12)

Pro silný déšť s vodivostí $498 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{ivn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{209 \cdot 2 \cdot \frac{11,317 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 10,686} + 24 \cdot 3 \cdot \frac{10,029 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 9,47}}{+ 6 \cdot 3 \cdot \frac{10,029 \cdot 10^{-8}}{6 \cdot 9,47} + 2 \cdot 2 \cdot \frac{10,029 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 9,47}} \right) =$$

$$= 1,214 \text{ A}$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{ivn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,668 \cdot 10^{-6}}{79,521} = 3,701 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}$$

(4.13)

4.3. Výpočet svodu na vybraném vedení V457

Jedná se o vedení, kde došlo k nové přezolaci a došlo k nové konfiguraci izolátorových závěsů na tomto vedení.

Údaje o vedení V457:

Trasa:	Krasíkov, Dlouhé Stráně
Sdružené napětí:	420 kV
Délka vedení:	59,799 km
Počet stožárů:	225
Typ stožárů:	Donau, Delta
Fázové vodiče:	3 x 3 x AlFe 450/52

Tabulka 4.7 Použité izolátorové závěsy u vedení V457

Typ izolátorového závěsu	počet stožárů k_n (-)	složení izolátorového závěsu i_n/j_n (-)
PS 210V	30	2//27
PSV 120A	60	2//27
PS 210V	36	2//23
PSV 120A	99	2//23

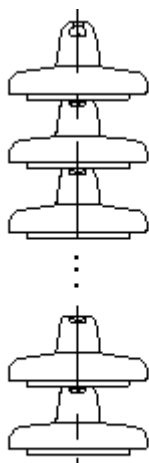
sdružené napětí $U_s = 420$ kV

fázové napětí U_f

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{420}{\sqrt{3}} = 242,48 \text{ kV} \quad (4.14)$$



Obr. 4.5 – Stožár s izolátorovými závěsy u vedení V457



Údaje o izolátoru:

hmotnost: 23 x 5,4 kg
 délka: 23 x 146 mm
 dov. zatížení: 40 kN
 nosnost: 120 kN
 stříšek: 23 ks

Tabulka 4.8 Výsledný tvarový faktor

n × objekt	$f_{tv} \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2})$	$n \times f_{tv} \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2})$
2 × čepka	0,9231	1,846
23 × stříška	0,891	20,495
celkem Σ	1,81	22,34

Obr. 4.6 – Návrh izolátoru PSV 120A

Tabulka 4.9 Hodnoty vypočtených γ pro izolátor PS 210V

Stav izolátoru	Za sucha	Slabý déšť	Silný déšť	Silný déšť
Vodivost ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)		97	97	498
Svodový proud (mA)	0,0034	0,0101	0,0088	0,0114
Tvarový faktor $f_{tv} \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2})$ 27xPS 210V	26,18	26,18	26,18	26,18
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$) 27xPS 210V	$3,67 \cdot 10^{-10}$	$1,09 \cdot 10^{-9}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$	$1,23 \cdot 10^{-9}$
Tvarový faktor $f_{tv} \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2})$ 23xPS 210V	22,6	22,6	22,6	22,6
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$) 23xPS 210V	$3,17 \cdot 10^{-10}$	$9,41 \cdot 10^{-10}$	$8,2 \cdot 10^{-10}$	$1,06 \cdot 10^{-9}$

Tabulka 4.10 Hodnoty vypočtených γ pro izolátor PSV 120A

Stav izolátoru	Za sucha	Slabý déšť	Silný déšť	Silný déšť
Vodivost ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)		97	97	498
Svodový proud (mA)	0,0034	0,0101	0,0088	0,0114
Tvarový faktor $f_{tv} \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2})$ 27xPSV 120A	25,91	25,91	25,91	25,91
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$) 27xPSV 120A	$3,63 \cdot 10^{-10}$	$1,07 \cdot 10^{-9}$	$9,4 \cdot 10^{-10}$	$1,21 \cdot 10^{-9}$
Tvarový faktor $f_{tv} \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2})$ 23xPSV 120A	22,34	22,34	22,34	22,34
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$) 23xPSV 120A	$3,13 \cdot 10^{-10}$	$9,3 \cdot 10^{-10}$	$8,11 \cdot 10^{-10}$	$1,05 \cdot 10^{-9}$

Výpočty svodových proudů a ztrát svodem u vedení V457:

Za sucha:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(30 \cdot 2 \cdot \frac{3,67 \cdot 10^{-10}}{26,18} + 60 \cdot 2 \cdot \frac{3,63 \cdot 10^{-10}}{25,91} + 36 \cdot 2 \cdot \frac{3,17 \cdot 10^{-10}}{22,6} + 99 \cdot 2 \cdot \frac{3,13 \cdot 10^{-10}}{22,34} \right) =$$

$$= 4,59 \text{ mA}$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 6,306 \cdot 10^{-9}}{59,799} = 18,6 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}$$

(4.15)

Pro slabý déšť s vodivostí $97 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(30 \cdot 2 \cdot \frac{1,09 \cdot 10^{-9}}{26,18} + 60 \cdot 2 \cdot \frac{1,07 \cdot 10^{-9}}{25,91} + 36 \cdot 2 \cdot \frac{9,41 \cdot 10^{-10}}{22,6} + 99 \cdot 2 \cdot \frac{9,3 \cdot 10^{-10}}{22,34} \right) =$$

$$= 14 \text{ mA}$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,869 \cdot 10^{-8}}{59,799} = 55,15 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}$$

(4.16)

Pro silný déšť s vodivostí $97 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(30 \cdot 2 \cdot \frac{9,5 \cdot 10^{-10}}{26,18} + 60 \cdot 2 \cdot \frac{9,4 \cdot 10^{-10}}{25,91} + 36 \cdot 2 \cdot \frac{8,2 \cdot 10^{-10}}{22,6} + 99 \cdot 2 \cdot \frac{8,11 \cdot 10^{-10}}{22,34} \right) =$$

$$= 12 \text{ mA}$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,633 \cdot 10^{-8}}{59,799} = 48,17 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}$$

(4.17)

Pro silný déšť s vodivostí $498 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(30 \cdot 2 \cdot \frac{1,23 \cdot 10^{-9}}{26,18} + 60 \cdot 2 \cdot \frac{1,21 \cdot 10^{-9}}{25,91} + 36 \cdot 2 \cdot \frac{1,06 \cdot 10^{-9}}{22,6} + 99 \cdot 2 \cdot \frac{1,05 \cdot 10^{-9}}{22,34} \right) = 15 \text{ mA}$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 2,111 \cdot 10^{-8}}{59,799} = 62,3 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1} \quad (4.18)$$

4.4. Výpočet svodu na vybraném vedení V443

Jedná se o vedení, kde došlo k nové přezolaci a došlo k nové konfiguraci izolátorových závěsů na tomto vedení.

Údaje o vedení V443:

Trasa:	Albrechtice, Dobrzeň
Sdružené napětí:	420 kV
Délka vedení:	157,31 km
Počet stožárů:	524
Typ stožárů:	Donau, Portál
Fázové vodiče:	3 x 3 x 382-AL/49-ST1A

Tabulka 4.11 Použité izolátorové závěsy u vedení V443

Typ izolátorového závěsu	počet stožárů k_n (-)	složení izolátorového závěsu i_n/j_n (-)
H400.120.3100.C.C.19L	308	2//2
H400.210.3130.C.C.22L	216	2//2

sdružené napětí $U_s = 420 \text{ kV}$

fázové napětí U_f

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{420}{\sqrt{3}} = 242,48 \text{ kV} \quad (4.19)$$

Ukázka výpočtu měrné povrchové vodivosti pro silný déšť s vodivostí $498 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ u izolátoru H400.120.3100.C.C.19L:

$$\gamma_{19L} = f_{iv/19L} \cdot \frac{I_{svod}}{U_f} = 72,3 \cdot \frac{2,04 \cdot 10^{-6}}{242,48 \cdot 10^3} = 6,08 \cdot 10^{-10} \text{ (S}\cdot\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}) \quad (4.20)$$



Údaje o izolátoru:

hmotnost: 12,3 kg
 délka: 3100 mm
 nosnost: 120 kN
 počet stříšek: 45

Tabulka 4.12 Výsledný tvarový faktor

$n \times \text{objekt}$	$f_{tv} \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2})$	$n \times f_{tv} \text{ (m} \cdot \text{mm}^{-2})$
2 \times čepka	1,456	2,912
45 \times stříška	1,5419	69,385
celkem Σ	3	72,3

Obr. 4.7– Náčrta izolátoru H400.120.3100.C.C.19L



Obr. 4.8 – Stožár s izolátorovými závěsy u vedení V443

Tabulka 4.13 Hodnoty vypočtených γ pro izolátor H400.120.3100.C.C.19L, H400.210.3130.C.C.22L

Stav izolátoru	Za sucha	Silný déšť
Vodivost ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		498
Svodový proud (μA)	0,84	2,04
Tvarový faktor f_{tv} ($\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$) H400.120.3100.C.C.19L	72,3	72,3
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S}\cdot\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$) H400.120.3100.C.C.19L	$2,5\cdot 10^{-10}$	$6,1\cdot 10^{-10}$
Tvarový faktor f_{tv} ($\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$) H400.210.3130.C.C.22L	72,3	72,3
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S}\cdot\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$) H400.210.3130.C.C.22L	$2,5\cdot 10^{-10}$	$6,1\cdot 10^{-10}$

Výpočty svodových proudů a ztrát svodem u vedení V443:

Za sucha:

$$I_{\text{svod}} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{\text{tvn}}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(308 \cdot 2 \cdot \frac{2,5 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 72,3} + 216 \cdot 2 \cdot \frac{2,5 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 72,3} \right) =$$

$$= 1,32 \text{ mA}$$

$$\Delta P_{\text{svod}} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{\text{tvn}}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,812 \cdot 10^{-9}}{157,31} = 2,03 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}$$

(4.21)

Pro silný déšť s vodivostí $498 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$:

$$I_{\text{svod}} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{\text{tvn}}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(308 \cdot 2 \cdot \frac{6,1 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 72,3} + 216 \cdot 2 \cdot \frac{6,1 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 72,3} \right) =$$

$$= 3,22 \text{ mA}$$

$$\Delta P_{\text{svod}} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{\text{tvn}}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 4,421 \cdot 10^{-9}}{157,31} = 5 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}$$

(4.22)

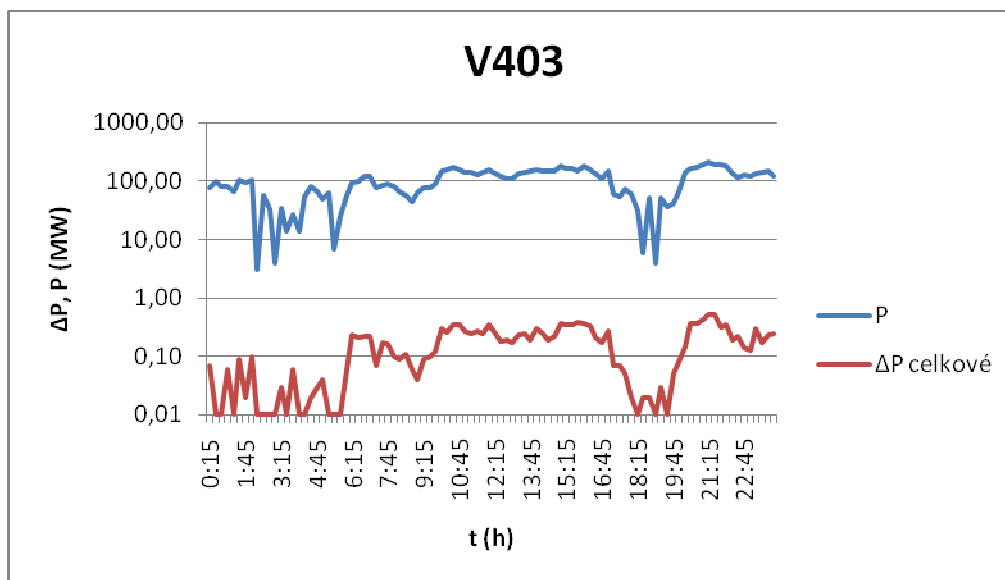
Tabulka 4.14 Porovnání svodových ztrát

Název vedení - izolátory	V403 - tyčové		V457 - skleněné		V443 - kompozitní	
Stav izolátoru	Ztráty na 1km vedení (kW/km)	Ztráty celého vedení (kW)	Ztráty na 1km vedení (kW/km)	Ztráty celého vedení (kW)	Ztráty na 1km vedení (kW/km)	Ztráty celého vedení (kW)
za sucha	0,0057	0,45	0,0186	1,11	0,0023	0,36
pro silný déšť s vodivostí $498 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	3,701	294,2	0,0623	3,72	0,005	0,79

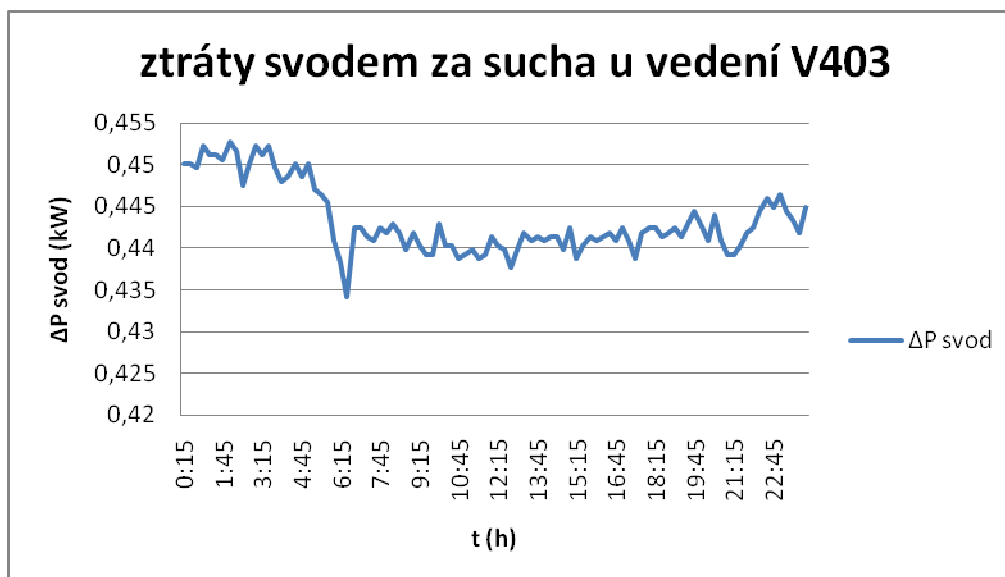
4.5. Svodové ztráty v závislosti na čase u vedení V403, V457 a V443

Z naměřených dat ČEPSu (sdružené napětí, činný výkon a činné ztráty) jsem si vybral náhodně jeden den (konkrétně 9.3.2009) a předpokládám, že tento den bylo sucho. Naměřený činný výkon a činné ztráty jsem vynesl v grafu pro uvedená vedení. Hodnoty sdruženého napětí jsem použil pro výpočet svodových ztrát na vedení. Data byla měřena v časových intervalech 15 minut.

Vedení V403:



Obr. 4.9 – Závislost výkonu a celkových ztrát na čase u vedení V403



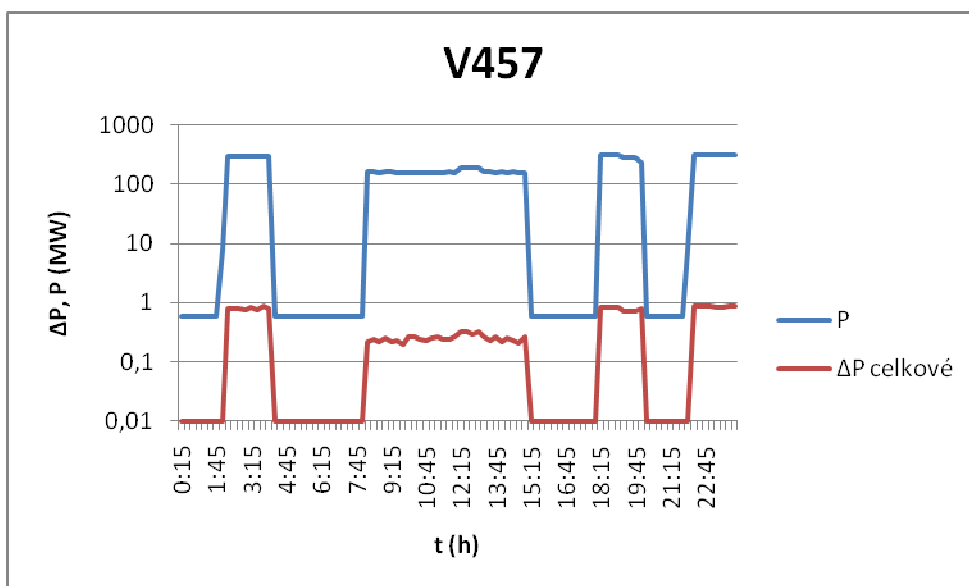
Obr. 4.10 – Závislost svodových ztrát na čase u vedení V403

Výpočet svodových ztrát jsem provedl dle vzorce:

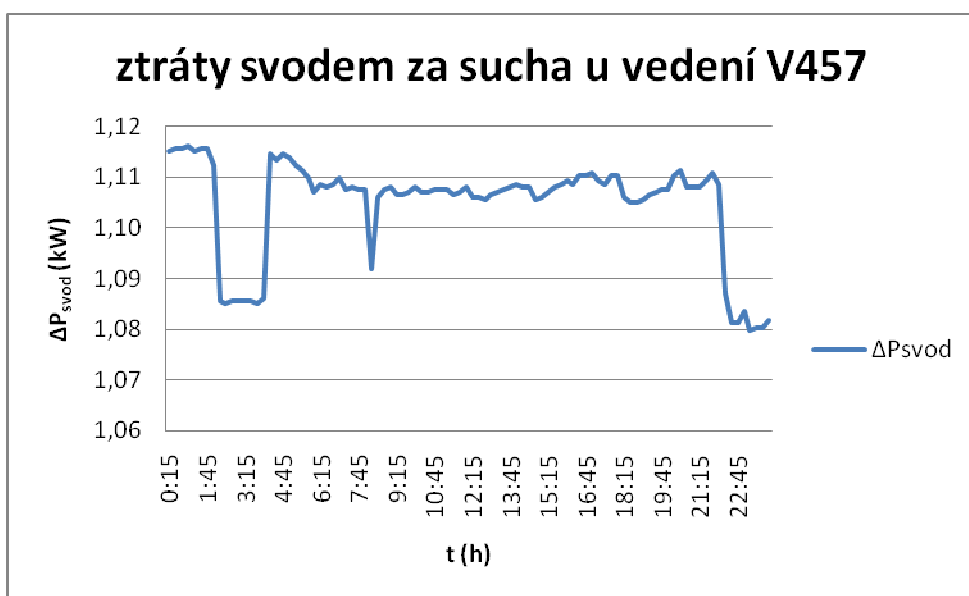
$$\Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^I \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = U_s^2 \cdot c = U_s^2 \cdot 2,595 \cdot 10^{-9} \text{ (kW)} \quad (4.23)$$

Hodnotu „c“ jsem použil z předešlého výpočtu svodových ztrát za sucha u vedení V403

Vedení V457:



Obr. 4.11 – Závislost výkonu a celkových ztrát na čase u vedení V457



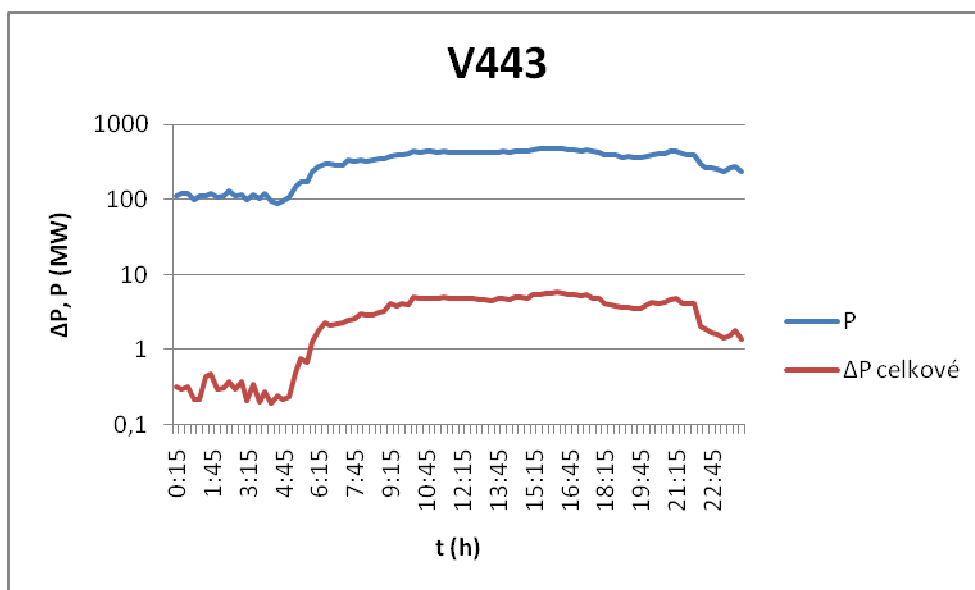
Obr. 4.12 – Závislost svodových ztrát na čase u vedení V457

Výpočet svodových ztrát jsem provedl dle vzorce:

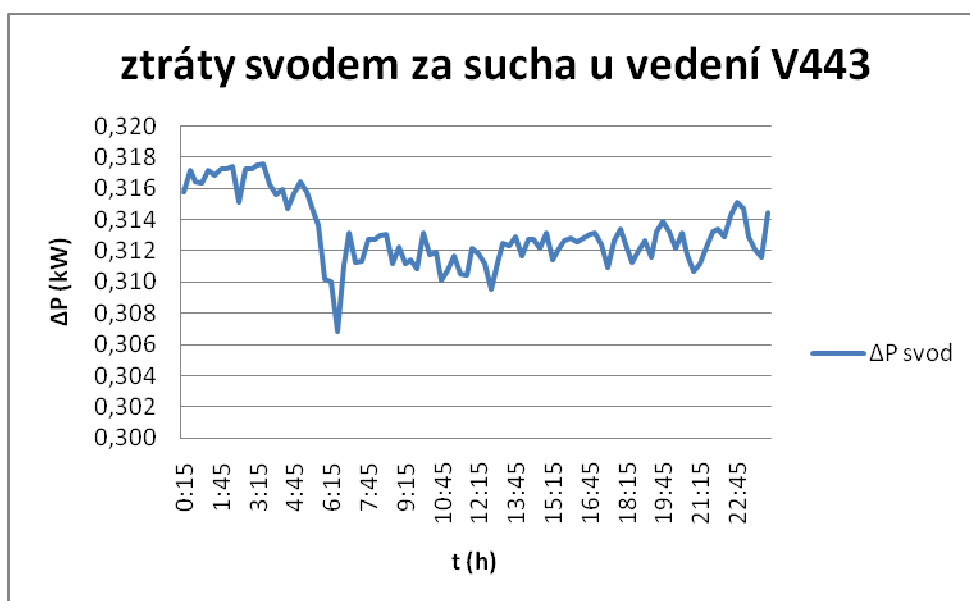
$$\Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{vn}} \right) = U_s^2 \cdot c = U_s^2 \cdot 6,306 \cdot 10^{-9} \text{ (kW)} \quad (4.24)$$

Hodnotu „c“ jsem použil z předešlého výpočtu svodových ztrát za sucha u vedení V457

Vedení V443:



Obr. 4.13 – Závislost výkonu a celkových ztrát na čase u vedení V443



Obr. 4.14 – Závislost svodových ztrát na čase u vedení V443

Výpočet svodových ztrát jsem provedl dle vzorce:

$$\Delta P_{\text{svod}} = U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{\text{tvn}}} \right) = U_s^2 \cdot c = U_s^2 \cdot 1,812 \cdot 10^{-9} \text{ (kW)} \quad (4.25)$$

Hodnotu „c“ jsem použil z předešlého výpočtu svodových ztrát za sucha u vedení V443

Hodnoty ztrát pro průměrný, maximální a minimální přenášený činný výkon:

Tabulka 4.15 Ztráty na vedení V403 za jeden den

Vedení V403				
	P (MW)	ΔP (MW)	ΔP_{svod} (kW)	ΔP_{svod} z ΔP (%)
$P_{\text{průměr}}$	102,27	0,16	0,443	0,28
P_{max}	216,46	0,52	0,439	0,08
P_{min}	2,99	0,01	0,452	4,51

Tabulka 4.16 Ztráty na vedení V457 za jeden den

Vedení V457				
	P (MW)	ΔP (MW)	ΔP_{svod} (kW)	ΔP_{svod} z ΔP (%)
$P_{\text{průměr}}$	122,89	0,28	1,105	0,39
P_{max}	311,50	0,86	1,081	0,13
P_{min}	0,60	0,01	1,109	11,10

Tabulka 4.17 Ztráty na vedení V443 za jeden den

Vedení V443				
	P (MW)	ΔP (MW)	ΔP_{svod} (kW)	ΔP_{svod} z ΔP (%)
$P_{\text{průměr}}$	322,58	3,07	0,313	0,01
P_{max}	483,16	5,67	0,313	0,01
P_{min}	89,45	0,24	0,315	0,13

V tabulkách 4.15, 4.16 a 4.17 jsou uvedeny hodnoty činného výkonu, činných ztrát a svodových ztrát. Lze vidět, že svodové ztráty se při změně zatížení nemění. V posledním sloupci jsou svodové ztráty vyčísleny v procentech celkových ztrát na vedení.

5. Modelové stavy izolátorových závěsů u vedení přenosové soustavy

Modelové stavy izolátorových závěsů jsem vytvořil pro srovnání nejvíce používaných typů izolátorových závěsů u vedení přenosové soustavy ČR. Vytvořil jsem tři fiktivní vedení o délce 100 km a sdruženém napětí 420 kV. Rozdíl je jen v použitých izolátorových závěsech a složení těchto závěsů. Vedení jsem pojmenoval V1, V2 a V3 a provedl u nich výpočet svodových ztrát pro tři stavy (sucho, silný déšť a námraza). U vedení V1 jsou použity tyčové izolátory LS75/21, u vedení V2 zase skleněné izolátory 23xPSV 120A a u vedení V3 jsou použity kompozitní izolátory H400.120.3100.C.C.19L. Při výpočtu svodových ztrát pro námrazu jsem počítal se svodovým proudem na izolátorovém závěsu 3x větším než u silného deště. Ztráty svodem při námraze bývají větší než ztráty svodem za deště, ale trvají jen velmi krátkou chvíli, neboť na povrchu izolátoru protékají větší proudy a dochází k tání námrazy.

5.1. Výpočet svodových ztrát u modelového vedení V1

Jde o vytvořené modelové vedení pro srovnání používaných izolátorových závěsů

Údaje o vedení V1:

Sdružené napětí: 420 kV

Délka vedení: 100 km

Počet stožárů: 330

Typ stožárů: Portál

330 stožárů s izolátorovým závěsem 2II3 LS75/21

Tabulka 5.1 Hodnoty vypočtených γ pro izolátor LS75/21

Stav izolátoru	Za sucha	Silný déšť	námraza
Vodivost ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		498	498
Svodový proud (mA)	0,004	2,568	7,704
Tvarový faktor f_{TV} ($\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$)	10,68	10,68	10,68
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S}\cdot\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$)	$1,76\cdot 10^{-10}$	$11,311\cdot 10^{-8}$	$33,93\cdot 10^{-8}$

Za sucha:

$$\begin{aligned}
 I_{svod} &= \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(330 \cdot 2 \cdot \frac{1,76 \cdot 10^{-10}}{3 \cdot 10,68} \right) = \\
 &= 2,64 \text{ mA} \\
 \Delta P_{svod} &= \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 3,625 \cdot 10^{-9}}{100} = 6,4 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Pro silný déšť s vodivostí $498 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(330 \cdot 2 \cdot \frac{11,311 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 10,68} \right) =$$

$$= 1,69 \text{ A}$$
(5.2)

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 2,33 \cdot 10^{-6}}{100} = 4,11 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}$$
(5.3)

Pro námrazu:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(330 \cdot 2 \cdot \frac{33,93 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 10,68} \right) =$$

$$= 5,08 \text{ A}$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 6,989 \cdot 10^{-6}}{100} = 12,33 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}$$
(5.4)

5.2. Výpočet svodových ztrát u modelového vedení V2

Jde o vytvořené modelové vedení pro srovnání používaných izolátorových závěsů

Údaje o vedení V2:

Sdružené napětí:	420 kV
Délka vedení:	100 km
Počet stožárů:	330
Typ stožárů:	Portál

330 stožárů s izolátorovým závěsem 2II23xPSV 120A

Tabulka 5.2 Hodnoty vypočtených γ pro izolátor PSV 120A

Stav izolátoru	Za sucha	Silný déšť	námraza
Vodivost ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		498	498
Svodový proud (mA)	0,0034	0,0114	0,0342
Tvarový faktor f_{TV} ($\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$)	22,34	22,34	22,34
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S}\cdot\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$)	$3,13 \cdot 10^{-10}$	$1,05 \cdot 10^{-9}$	$3,15 \cdot 10^{-9}$

Za sucha:

$$\begin{aligned}
 I_{svod} &= \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(330 \cdot 2 \cdot \frac{3,13 \cdot 10^{-10}}{22,34} \right) = \\
 &= 6,73 \text{ mA} \\
 \Delta P_{svod} &= \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 9,247 \cdot 10^{-9}}{100} = 16,3 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

Pro silný déšť s vodivostí $498 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$:

$$\begin{aligned}
 I_{svod} &= \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(330 \cdot 2 \cdot \frac{1,05 \cdot 10^{-9}}{22,34} \right) = \\
 &= 23 \text{ mA} \\
 \Delta P_{svod} &= \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 3,102 \cdot 10^{-8}}{100} = 54,7 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

Pro námrazu:

$$\begin{aligned}
 I_{svod} &= \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(330 \cdot 2 \cdot \frac{3,15 \cdot 10^{-9}}{22,34} \right) = \\
 &= 68 \text{ mA} \\
 \Delta P_{svod} &= \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 9,306 \cdot 10^{-8}}{100} = 164,1 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

5.3. Výpočet svodových ztrát u modelového vedení V3

Jde o vytvořené modelové vedení pro srovnání používaných izolátorových závěsů

Údaje o vedení V3:

Sdružené napětí:	420 kV
Délka vedení:	100 km
Počet stožárů:	330
Typ stožárů:	Portál

330 stožárů s izolátorovým závěsem 2II2 H400.120.3100.C.C.19L

Tabulka 5.3 Hodnoty vypočtených γ pro izolátor H400.120.3100.C.C.19L

Stav izolátoru	Za sucha	Silný déšť	námraza
Vodivost ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		498	498
Svodový proud (μA)	0,84	2,04	6,12
Tvarový faktor f_{TV} ($\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$)	72,3	72,3	72,3
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S}\cdot\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$)	$2,5\cdot 10^{-10}$	$6,1\cdot 10^{-10}$	$1,83\cdot 10^{-9}$

Za sucha:

$$\begin{aligned}
 I_{svod} &= \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(330 \cdot \frac{2,5 \cdot 10^{-10}}{72,3} \right) = \\
 &= 0,83 \text{ mA} \\
 \Delta P_{svod} &= \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,141 \cdot 10^{-9}}{100} = 2 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

Pro silný déšť s vodivostí $498 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$:

$$\begin{aligned}
 I_{svod} &= \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(330 \cdot \frac{6,1 \cdot 10^{-10}}{72,3} \right) = \\
 &= 2,03 \text{ mA} \\
 \Delta P_{svod} &= \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 2,784 \cdot 10^{-9}}{100} = 4,9 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

Pro námrazu:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 10^3 \cdot \left(330 \cdot \frac{1,83 \cdot 10^{-9}}{72,3} \right) =$$

$$= 6,08 \text{ mA}$$

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 8,353 \cdot 10^{-9}}{100} = 14,7 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}$$

(5.10)

5.4. Zhodnocení výpočtu modelového vedení

Tabulka 5.4 Hodnoty svodových ztrát modelového vedení

Název vedení - izolátor	V1 - tyčový		V2 - skleněný		V3 - kompozitní	
Stav izolátoru	Ztráty na 1km vedení (kW/km)	Ztráty celého vedení (kW)	Ztráty na 1km vedení (kW/km)	Ztráty celého vedení (kW)	Ztráty na 1km vedení (kW/km)	Ztráty celého vedení (kW)
za sucha	0,0064	0,64	0,0163	1,63	0,002	0,2
pro silný déšť	4,11	411	0,0547	5,47	0,0049	0,49
pro námrazu	12,33	1233	0,1641	16,41	0,0147	1,47

Za sucha vyšly svodové ztráty pro všechny tři typy použitých izolátorů poměrně nízké. Nejmenší svodové ztráty však byly u kompozitního izolátoru. Za silného deště už však vznikaly velké rozdíly svodových ztrát mezi použitými izolátorovými závěsy. Největší svodové ztrát vyšly u vedení V1, kde je použito tyčového izolátorového závěsu LS75/21. U izolátorového závěsu LS75/21 se nejvíce projevuje vliv deště a na jeho povrchu vznikají částečné výboje přes suché vrstvy. U druhého vedení V2 se skleněným izolátorovým závěsem PSV 120A vyšly svodové ztráty poměrně nízké a je to dáno tím, že za deště zůstávají spodní plochy stříšek suché, které brání průchodu zvýšeného svodového proudu. Nejlépe dopadlo vedení V3 s kompozitními izolátory, kde svodové ztráty jsou minimální. U kompozitního izolátoru, jehož povrch má hydrofobní charakter, nevznikají na povrchu souvislé vlhké plochy a svodový proud je proto velmi nízký. Při námraze jsem počítal se svodovým proudem 3x větším než u stavu za silného deště, takže výsledky byly stejné, jen 3x větší.

5.5. Svodové ztráty v závislosti na čase u modelových vedení V1, V2, V3

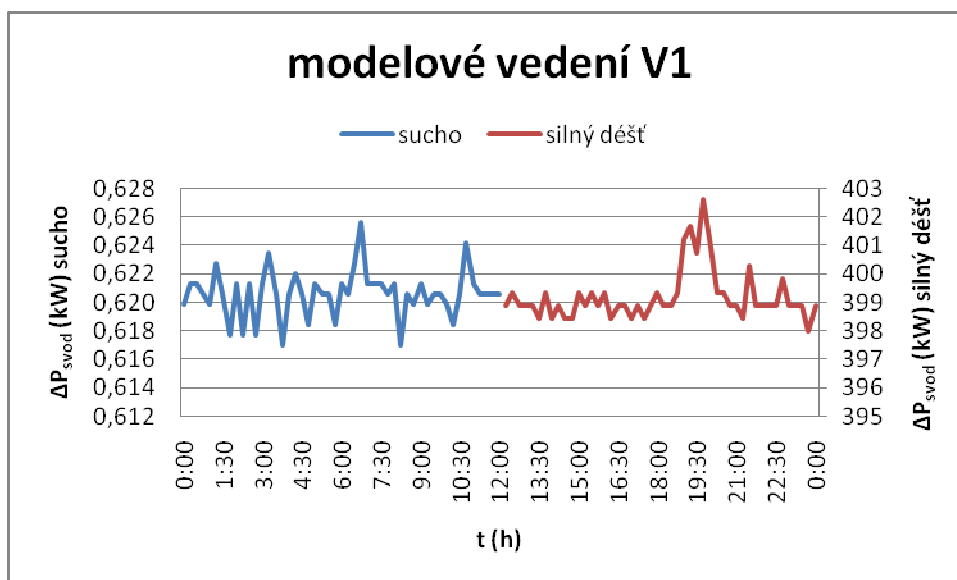
Z naměřených dat ČEPSu jsem pro tyto závislosti použil hodnoty sdruženého napětí, které byly na vedení V432 dne 1.3.2009. Tento den i vedení jsem si vybral náhodně a jde o vedení 420kV. Hodnoty sdruženého napětí jsem pak použil pro výpočet svodových ztrát u předešlého modelového vedení V1, V2 a V3. Den jsem rozdělil na dvě části, kdy 12 hodin bylo sucho, a dalších 12 hodin byl silný déšť.

V1 - tyčové izolátory LS75/21

V2 - skleněné izolátory 23xPSV 120A

V3 - kompozitní izolátory H400.120.3100.C.C.19L

Vedení V1 – použité jsou tyčové izolátory:



Obr. 5.1 – Závislost svodových ztrát na čase u modelového vedení V1

Výpočet svodových ztrát jsem provedl dle vzorce:

Za sucha:

$$\Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{ivn}} \right) = U_s^2 \cdot c = U_s^2 \cdot 3,625 \cdot 10^{-9} \text{ (kW)} \quad (5.11)$$

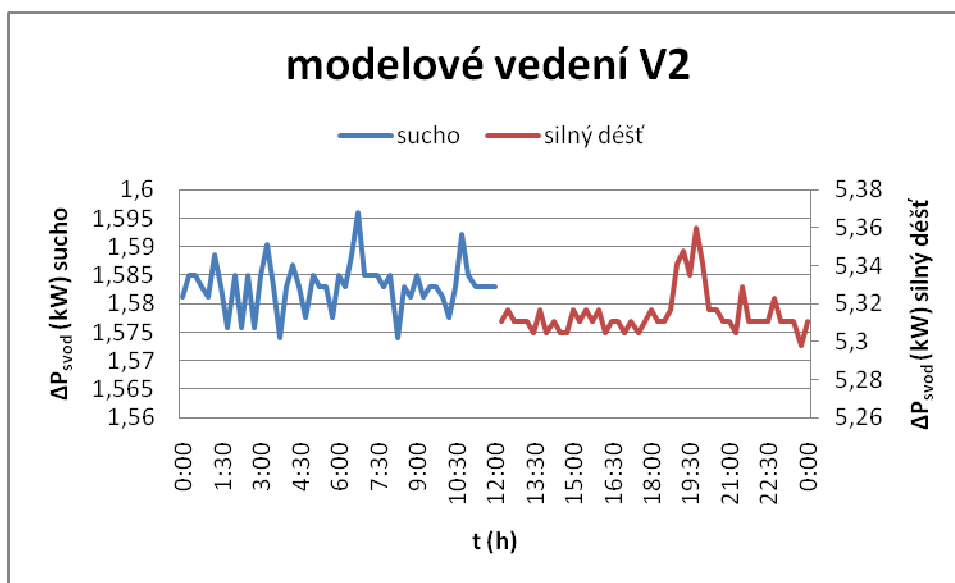
Hodnotu „c“ jsem použil z předešlého výpočtu svodových ztrát za sucha u vedení V1

Za silného deště:

$$\Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{ivn}} \right) = U_s^2 \cdot c = U_s^2 \cdot 2,33 \cdot 10^{-6} \text{ (kW)} \quad (5.12)$$

Hodnotu „c“ jsem použil z předešlého výpočtu svodových ztrát za silného deště u vedení V1

Vedení V2 – použité jsou skleněné izolátory:



Obr. 5.2 – Závislost svodových ztrát na čase u modelového vedení V2

Výpočet svodových ztrát jsem provedl dle vzorce:

Za sucha:

$$\Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = U_s^2 \cdot c = U_s^2 \cdot 9,247 \cdot 10^{-9} \text{ (kW)} \quad (5.13)$$

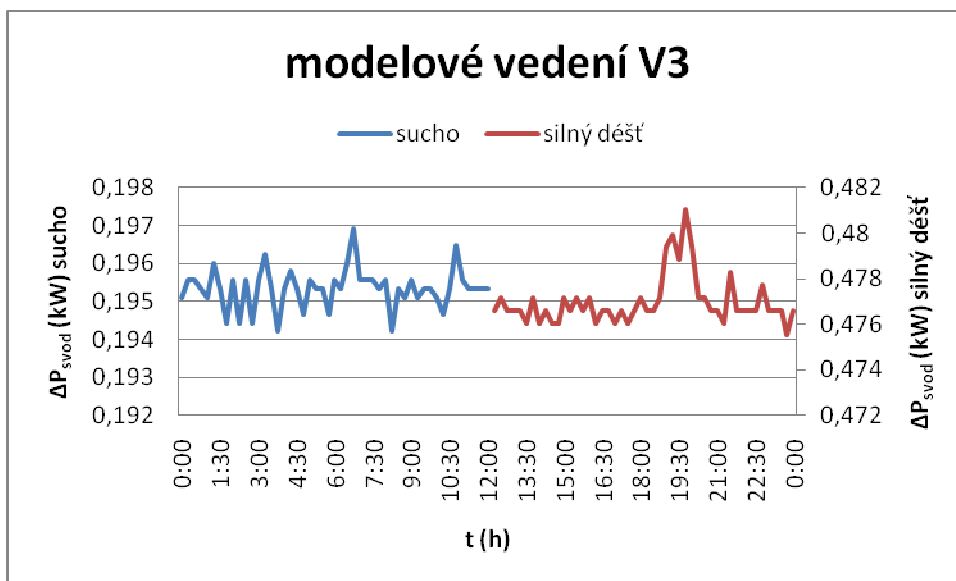
Hodnotu „c“ jsem použil z předešlého výpočtu svodových ztrát za sucha u vedení V2

Za silného deště:

$$\Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = U_s^2 \cdot c = U_s^2 \cdot 3,102 \cdot 10^{-8} \text{ (kW)} \quad (5.14)$$

Hodnotu „c“ jsem použil z předešlého výpočtu svodových ztrát za silného deště u vedení V2

Vedení V3 – použité jsou kompozitní izolátory:



Obr. 5.3 – Závislost svodových ztrát na čase u modelového vedení V3

Výpočet svodových ztrát jsem provedl dle vzorce:

Za sucha:

$$\Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = U_s^2 \cdot c = U_s^2 \cdot 1,141 \cdot 10^{-9} \text{ (kW)} \quad (5.15)$$

Hodnotu „c“ jsem použil z předešlého výpočtu svodových ztrát za sucha u vedení V3

Za silného deště:

$$\Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{tvn}} \right) = U_s^2 \cdot c = U_s^2 \cdot 2,784 \cdot 10^{-9} \text{ (kW)} \quad (5.16)$$

Hodnotu „c“ jsem použil z předešlého výpočtu svodových ztrát za silného deště u vedení V3

Za sucha lze vidět, že u všech tří typu izolátorů vyšly svodové ztráty poměrně malé. Největší svodové ztráty byly u vedení V2, kde jsou použity skleněné izolátory. Za silného deště už nastávají velké rozdíly u svodových ztrát použitých typů izolátorů. Nejmenší svodové ztráty byly u vedení V3, kde byly použity kompozitní izolátory. O něco větší ztráty byly u vedení V2, kde byly použity skleněné izolátory. Nejhuře obstály tyčové izolátory, kde svodové ztráty dosahovaly hodnot 400kW.

6. Koeficient respektující vrstvu znečištění na izolátorech, typ, složení a počet izolátorových závěsů na vedení VVN a ZVN

Koeficient „c“ zahrnuje počet stožárů, složení, tvar a měrnou povrchovou vodivost izolátorových závěsů. Slouží pro výpočet svodových ztrát u vedení přenosové soustavy.

$$c = \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{lvm}} \right) \quad (\text{S}, -, \text{S} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}, -, \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}) \quad (6.1)$$

- l_n počet skupin stožárů se stejným izolátorovým závěsem na obecném vedení (-)
- k_n počet stožárů n-té skupiny se stejným izolátorovým závěsem na obecném vedení (-)
- i_n počet paralelních větví v izolátorovém závěsu jedné fáze obecného vedení v n-té skupině stožárů (-)
- j_n počet izolátorů v jedné fázi v sérii jednoho izolátorového závěsu v n-té skupině stožárů obecného vedení (-)
- f_{lvm} tvarový faktor jednoho izolátoru v n-té skupině stožárů obecného vedení ($\text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$)
- γ_n měrná povrchová vodivost typu izolátoru z n-té skupiny stožárů obecného vedení ($\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$)

Tabulka 6.1 Koeficient „c“ u vybraných vedení

Stav izolátoru	Za sucha	Slabý déšť	Silný déšť	Slabý déšť	Silný déšť
Vodivost ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)		97	97	498	498
Vedení - izolátor	Koeficient c ($\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$)				
V403	2,60E-09	1,80E-07	5,28E-07	1,24E-06	1,67E-06
v457	6,31E-09	1,87E-08	1,63E-08	-	2,11E-08
V443	1,81E-09	-	-	-	4,42E-09
V1 - tyčový	3,63E-09	2,51E-07	7,37E-07	1,74E-06	2,33E-06
V2 - skleněný	9,25E-09	2,75E-08	2,40E-08	-	3,10E-08
V3 - kompozitní	1,14E-09	-	-	-	2,78E-09
V1 - tyčový/km	3,63E-11	2,51E-09	7,37E-09	1,74E-08	2,33E-08
V2 - skleněný/km	9,25E-11	2,75E-10	2,40E-10	-	3,10E-10
V3 - kompozitní/km	1,14E-11	-	-	-	2,78E-11

Z předešlé tabulky vidíme, že koeficient „c“ se mění u každého vedení jinak. Proto chceme definovat tento koeficient pro různé stavy, jako jsou např. sucho a déšť. Pro tři nečastější používané izolátorové závěsy u přenosové soustavy jsme vypočítali tento koeficient a to pro tyčový izolátorový závěs LS75/21, skleněný izolátorový závěs 23xPSV 120A a kompozitní izolátorový závěs H400.120.3100.C.C.19L. Jestliže budeme znát tyto koeficienty pro různé typy izolátorových závěsů a jejich složení, můžeme potom určit přibližnou hodnotu svodových ztrát v daném okamžiku.

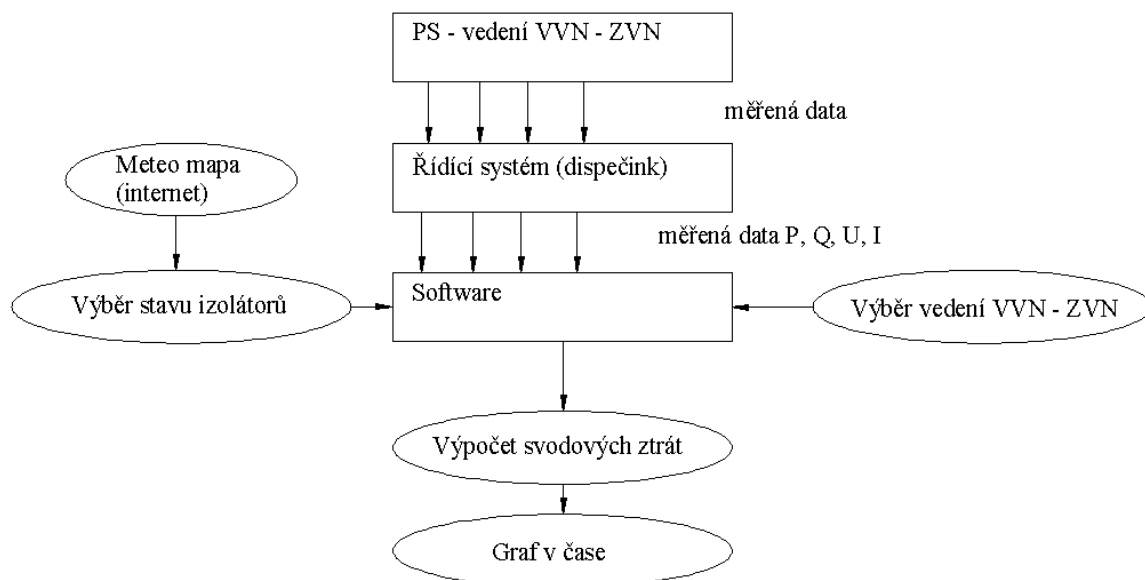
7. Uplatnění metodiky výpočtu svodových ztrát

Uplatnění metodiky výpočtu lze použít při různých výpočtových softwarech. Jestliže budeme znát svodové proudy používaných izolátorových závěsů pro různé meteorologické podmínky jako např. déšť, námraza, sníh a dále stupeň znečištění pro lokality, kde se vedení nachází, můžeme potom pomocí programu vypočítat svodové ztráty na určitém vedení. Potom by se dalo pomocí čerstvě naměřených dat z Českého hydrometeorologického ústavu vypočítat aktuální svodové ztráty. Tyto aktuální svodové ztráty pak mohou být zahrnuty k předpokládanému zatížení.

Dále by bylo možné vytvořit predikční závislost, která se řídí modely závislosti prognózy velikosti svodových ztrát na atmosférických vlivech (např. teploty nebo faktor měrné povrchové vodivosti znečištění).

Program pro zjišťování svodových ztrát ON-LINE:

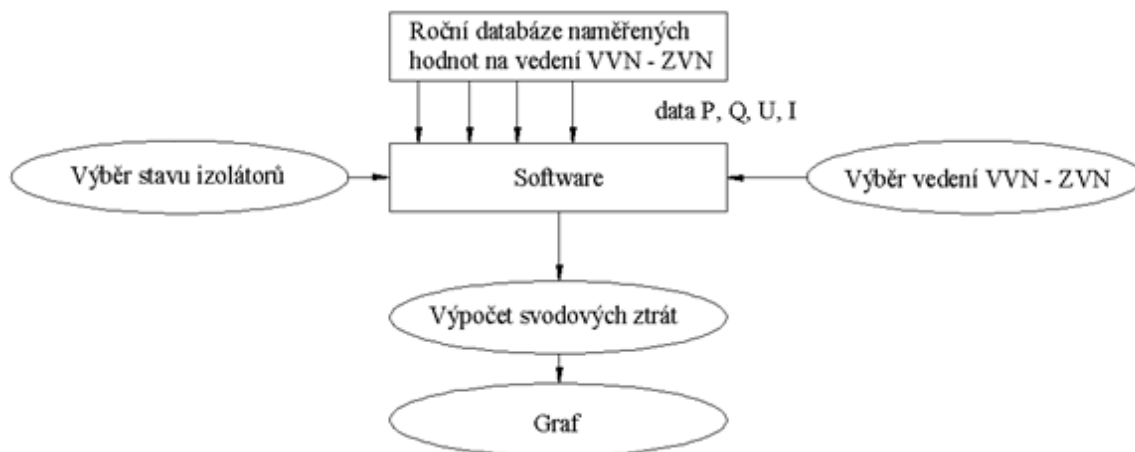
U tohoto použití jsou načítána data z vedení přenosové soustavy do řídicího systému. Z řídicího systému pak jdou vybraná data (P, Q, U, I) do programu. Nyní musí dispečer vybrat vedení přenosové soustavy, u kterého chce vypočítat svodové ztráty. Následně dispečer sleduje data z Českého hydrometeorologického ústavu a podle nich zvolí stav izolátorů (sucho, déšť, atd.). Jakmile se navolí všechny hodnoty, proběhne výpočet a také vyhodnocení v grafu.



Obr. 7.1 – Schéma využití programu pro ON-LINE měření

Program pro statický výpočet:

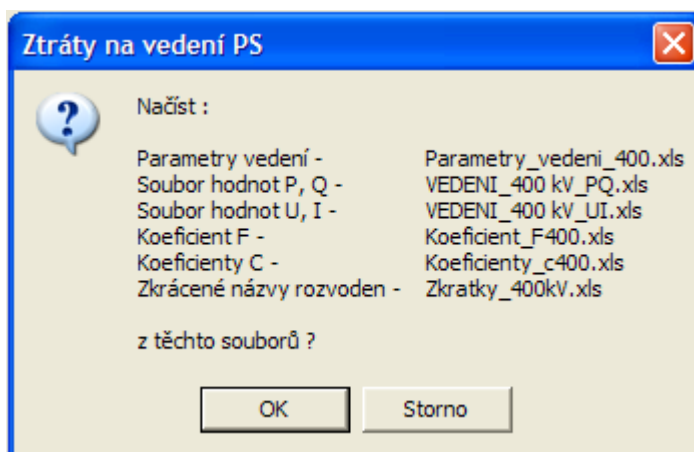
Program pro statický výpočet funguje na podobném principu jako program pro použití ON-LINE, jen s tím rozdílem, že se do programu nenačítají data ve skutečném čase, ale z databáze naměřených dat.



Obr. 7.2 – Schéma využití programu pro statické výpočty

Výběr parametrů:

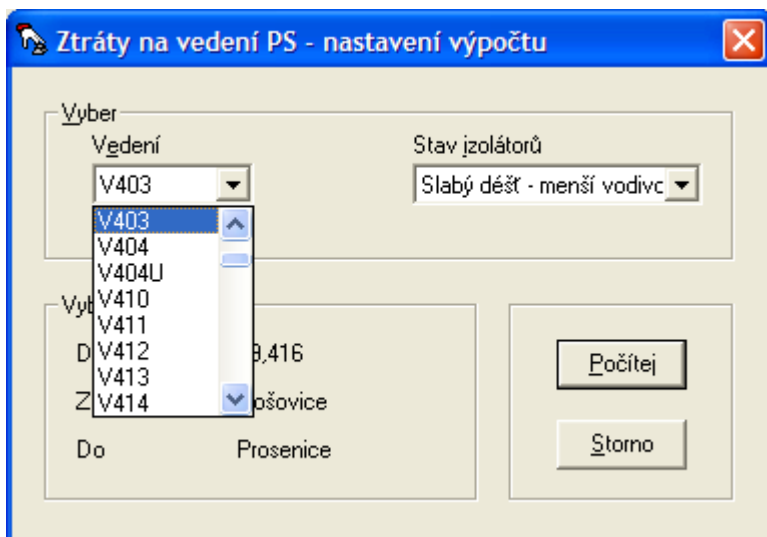
Zde je ukázka z programu pro statický výpočet svodových ztrát u vedení přenosové soustavy, kde se vybírají data z uložené databáze.



Obr. 7.3 – Ukázka z programu – výběr parametrů

Výběr vedení:

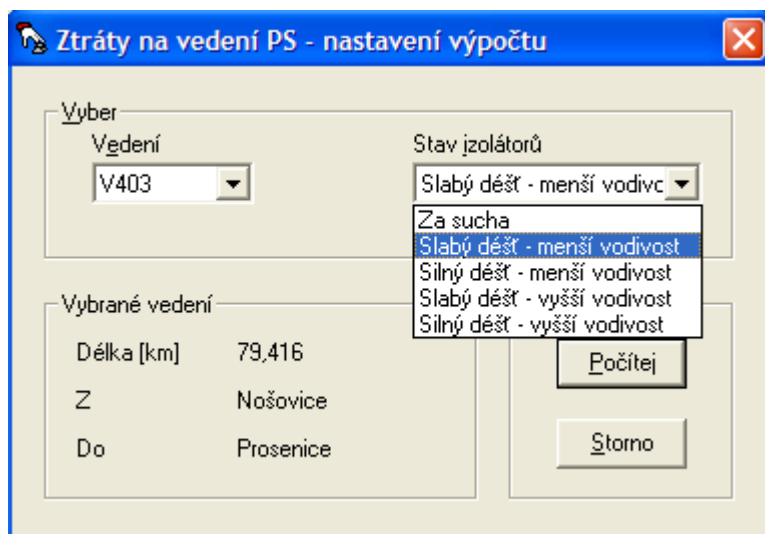
Zde je ukázka z programu pro statický výpočet svodových ztrát u vedení přenosové soustavy, kde se vybírá konkrétní vedení, které chceme počítat.



Obr. 7.4 – Ukázka z programu – výběr vedení

Výběr stavu:

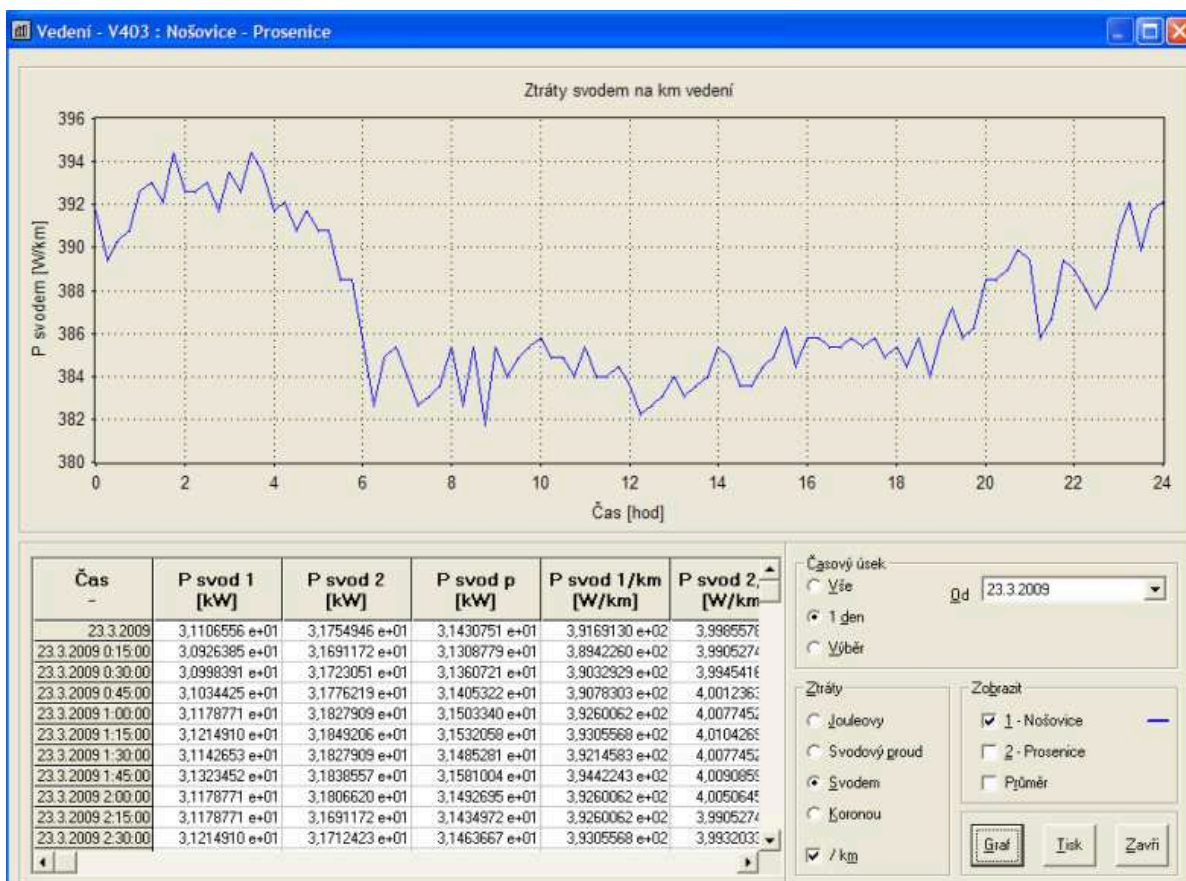
Zde je ukázka z programu pro statický výpočet svodových ztrát u vedení přenosové soustavy, kde se vybírá stav izolátorů.



Obr. 7.5 – Ukázka z programu – výběr stavu izolátoru

Výsledný graf:

Zde je ukázka z programu pro statický výpočet svodových ztrát u vedení přenosové soustavy, kde se navolí konkrétní časové období, pro které chceme svodové ztráty vyhodnotit. Stisknutím tlačítka „Graf“ se nám už zobrazí výsledné svodové ztráty ve zvoleném období.



Obr. 7.6 – Ukázka z programu – závislost svodových ztrát na čase

8. Porovnání metodiky výpočtu svodových ztrát na izolátorových závěsech

Metodiku, kterou jsem použil pro výpočet svodových ztrát v diplomové práci, nyní porovnám s metodikou výpočtu z laboratoře vvn EGÚ v Praze Běchovicích. Výpočet jsem provedl opět pro tři nejpoužívanější typy izolátorových závěsů přenosové soustavy. Jde o izolátorový závěs LS75/21, izolátorový závěs PSV 120A a izolátorový závěs Furukawa (H400.120.3100.C.C.19L).

Metodika výpočtu z EGÚ:

Výpočet svodových ztrát na jednom izolátorovém závěsu:

$$\Delta P_{zdv} = U_f \cdot I_{svod \max} / \sqrt{2} \text{ (mA, kV, W)} \quad (8.1)$$

Výpočet svodových ztrát na 1km vedení:

Při výpočtu se uvažuje 9 izolátorových závěsů na 1km vedení

$$\Delta P_{1km} = 9 \cdot \Delta P_{zdv} / 1000 \text{ (W, kW)} \quad (8.2)$$

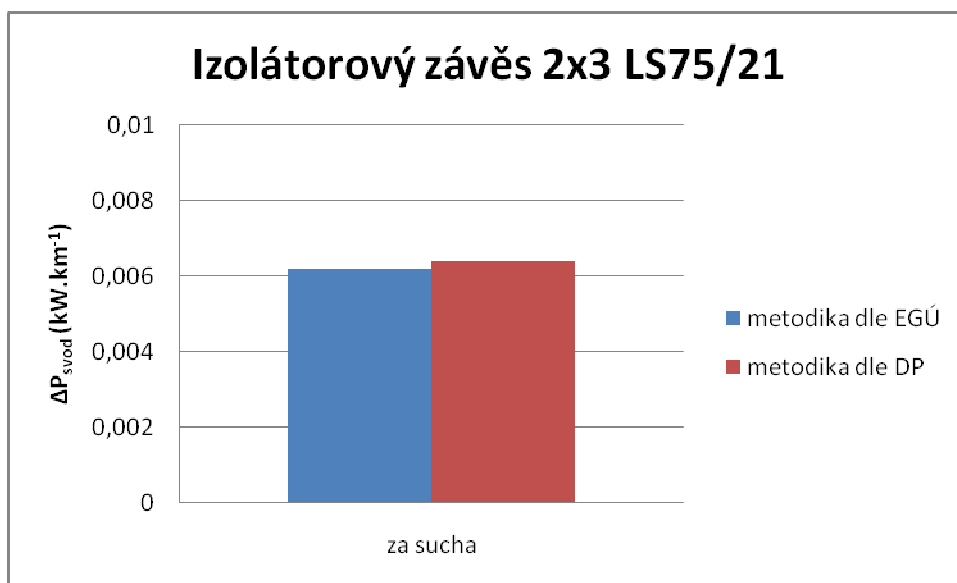
Tabulka 8.1 Vypočtené hodnoty svodových ztrát pomocí metodiky z EGÚ

Typ závěsu		2x3 LS75/21	2x23 PSV 120 A	1x Furukawa
Zkušební podmínky	vodivost (μS/cm)	Ztráty na 1km (kW/km)	Ztráty na 1km (kW/km)	Ztráty na 1km (kW/km)
za sucha		0,0062	0,0104	0,0013
slabý déšť	97	0,429	0,0312	-
silný déšť	97	1,253	0,0272	-
slabý déšť s vyšší vodivostí	498	2,953	-	-
silný déšť s vyšší vodivostí	498	3,963	0,0352	0,0031

Tabulka 8.2 Vypočtené hodnoty svodových ztrát dle metodiky diplomové práce

Typ závěsu		2x3 LS75/21	2x23 PSV 120 A	1x Furukawa
Zkušební podmínky	vodivost (μS/cm)	Ztráty na 1km (kW/km)	Ztráty na 1km (kW/km)	Ztráty na 1km (kW/km)
za sucha		0,0064	0,0163	0,00201
slabý déšť	97	0,443	0,0485	-
silný déšť	97	1,3	0,0423	-
slabý déšť s vyšší vodivostí	498	3,063	-	-
silný déšť s vyšší vodivostí	498	4,11	0,0547	0,0049

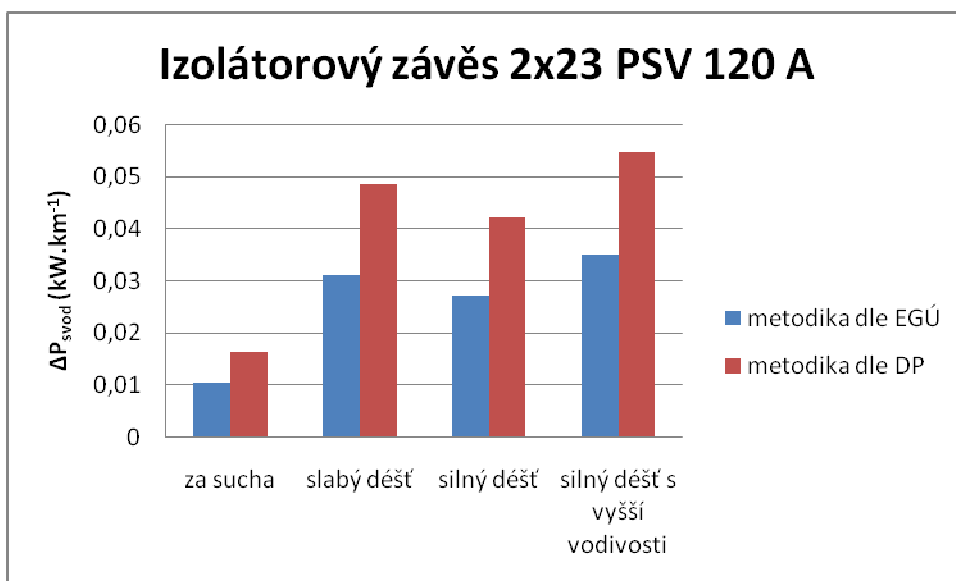
Porovnání metodik dle laboratoře EGÚ a dle diplomové práce:



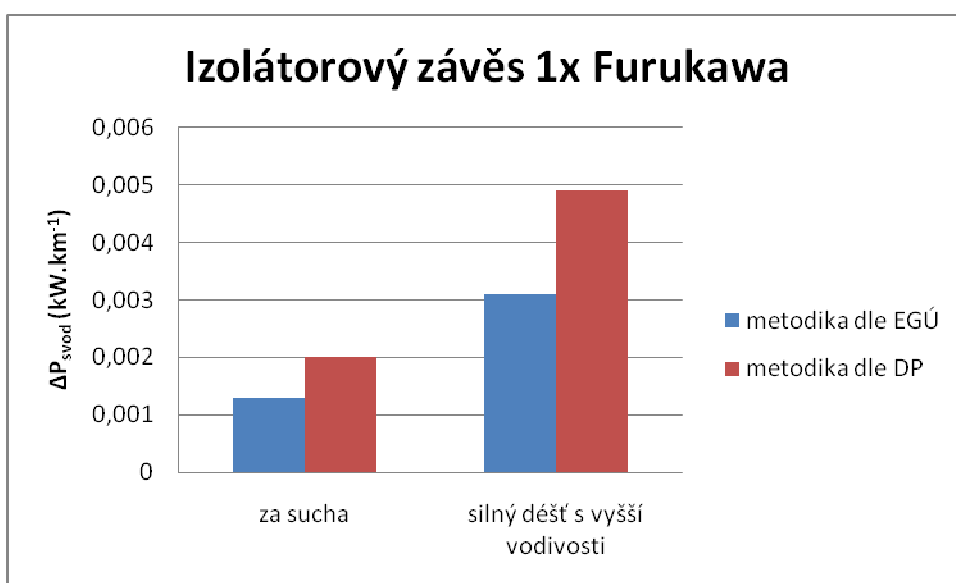
Obr. 8.1 – Porovnání metodik výpočtu pro izolátorový závěs 2x3 LS75/21



Obr. 8.2 – Porovnání metodik výpočtu pro izolátorový závěs 2x3 LS75/21



Obr. 8.3 – Porovnání metodik výpočtu pro izolátorový závěs 2x23 PSV 120 A



Obr. 8.4 – Porovnání metodik výpočtu pro izolátorový závěs Furukawa

Z porovnání metodik lze vidět, že u izolátorového závěsu LS75/21 vyšly svodové ztráty poměrně stejně. U zbylých dvou typů izolátorových závěsů, už se metody lišily. Je to dáno tím, že jsem uvažoval 9 izolátorových závěsů na 1km vedení, což není úplně přesné a také použita metodika v diplomové práci je přesnější, neboť zahrnuje tvarový faktor izolátoru, složení izolátorového závěsu a také přesný počet stožárů.

9. Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval vlivem znečištění a vlhkosti na izolátorových závěsech u vedení přenosové soustavy na velikost svodových ztrát. V prvním bodě je proveden rozbor vedení přenosové soustavy České republiky, neboť u vedení přenosové soustavy se svodové ztráty nezanedbávají a musí se těmito ztrátami počítat. Zmínil jsem zde i nově vybudovanou rozvodnu Kletné TR 400/110 kV, jelikož jde o důležitou uzlovou stanici pro dodávky elektrické energie do Moravskoslezského kraje. Ve druhém bodě diplomové práce jsem popsal technické ztráty, které vznikají u vedení přenosové soustavy VVN a ZVN. Třetí bod je zaměřený na problematiku znečištění a tvar izolátorových závěsů přenosové soustavy a jejich vliv na velikost svodových ztrát. Pomocí programu AutoCAD zde popisuji postup výpočtu tvarového faktoru a následně měrnou povrchovou vodivost izolátorového závěsu. Ve čtvrtém bodě jsem použil postup výpočtu tvarového faktoru a měrné povrchové vodivosti už na konkrétní izolátorové závěsy. Následně z těchto výpočtů jsem počítal svodové ztráty u vedení přenosové soustavy České republiky a to na vedení V403, V457 a V443. U těchto skutečných vedení 420 kV jsem simuloval vliv počasí (sucho, slabý déšť, silný déšť) a znečištění na velikost svodových ztrát. Hodnoty svodových proudů na izolátorových závěsech byly naměřeny v laboratoři VVN v Praze Běchovicích. Výsledné svodové ztráty určitě nejsou zanedbatelné a mají podstatný vliv na celkové technické ztráty. V pátém bodě jsem porovnával tři nejpoužívanější typy izolátorových závěsů tak, že jsem vytvořil modelová vedení o délce 100 km a provedl u nich vliv vlhkosti a znečištění na velikost svodových ztrát. U modelového stavu za sucha byly hodnoty svodových ztrát malé u všech tří izolátorových závěsů, ale za silného deště už byly znát velké rozdíly. Nejlépe obstál použitý kompozitní izolátorový závěs Furukawa, u kterého vyšly svodové ztráty hodně malé i za silného deště s větším znečištěním a je to dáno tím, že izolátor Furukawa má povrch hydrofobního charakteru, tudíž na povrchu izolátoru nevznikají souvislé vlhké plochy a svodový proud je proto velmi nízký. U druhého použitého skleněného izolátorového závěsu PSV 120A vyšly svodové ztráty poměrně nízké a je to dáno tím, že za deště zůstávají spodní plochy stříšek suché, které brání průchodu zvýšeného svodového proudu. Nejhůře obstál tyčový izolátorový závěs LS75/21, u kterého se nejvíce projevuje vliv deště a hodnoty svodových ztrát u tohoto izolátoru byly vysoké. Závěrem diplomové práce uvádím možnost použití této metodiky výpočtu svodových ztrát ve výpočtových softwarech a také možnost vytvořit predikční závislost, která se řídí modely závislosti prognózy velikosti svodových ztrát na atmosférických vlivech, ale vzhledem k rozsahu diplomové práce a řešení výpočtů svodových ztrát na vedení přenosové soustavy jsem predikční modely ztrát svodem neřešil. Také uvádím porovnání výpočtu svodových ztrát dle metodiky laboratoře EGÚ a dle metodiky diplomové práce. V Diplomové práci jsem používal pro výpočty naměřená data ze společnosti ČEPS, a.s. a z laboratoře EGÚ.

10. Seznam použité literatury

- [1] HODINKA, M.: *Elektrické sítě I*, skriptum VŠB v Ostravě 1973
- [2] RUDOLF, L.: *Metodika výpočtu svodových proudů a ztrát svodem na vedení VVN a ZVN*, sborník z odborného semináře Poděbrady 2003
- [3] RUDOLF, L.: *Závislost elektrických ztrát vedení přenosové soustavy na atmosférických vlivech*, disertační práce, VŠB - TUO Ostrava, 2003
- [4] RUDOLF, L.: *Svod a jeho velikost na vedení VVN a ZVN*, příspěvek na mezinárodní vědecké konferenci Electric Power Engineering, Brno 2006, sborník ISBN 80-214-3180-6
- [5] HRADÍLEK, Z.: *Elektroenergetika*, skriptum VŠB v Ostravě 1992
- [6] SANTARIUS, P.: *Elektrické stanice a vedení*, skriptum VŠB v Ostravě 1990
- [7] RUDOLF, L.: *Komplexní rozbor elektrických ztrát vedení PS*, habilitační práce, VŠB - TUO, 2009
- [8] Dokumentace ČEPS, a.s.
- [9] ČSN 33 0405. *Elektrotechnické předpisy. Navrhování venkovní elektrické izolace podle stupně znečištění*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1989. 16 s.
- [10] VACULÍK, P.: *Predikce technických ztrát s ohledem na změny venkovní teploty u vedení přenosové soustavy*, diplomová práce, VŠB-TUO Ostrava, 2011
- [11] EGÚ-Laboratoř velmi vysokého napětí a.s.: *VYHODNOCENÍ ZTRÁT KORÓNOU A ZTRÁT NA IZOLÁTOROVÝCH ZÁVĚSECH V PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ ČEPS, a.s.*; Praha, 2005. 31s.
- [12] RUDOLF, L.; LAGO, J.: *Vliv tvaru povrchové dráhy izolátorů na velikost svodového proudu*, sborník z odborného semináře Poděbrady, 2004